

中华人民共和国国家标准

GB/T 228.1—2021

代替 GB/T 228.1—2010

金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法

Metallic materials—Tensile testing—
Part 1: Method of test at room temperature

(ISO 6892-1: 2019, MOD)

2021-12-31 发布

2022-07-01 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 符号和说明	10
5 原理	12
6 试样	12
7 原始横截面积的测定	13
8 原始标距和引伸计标距	13
9 试验设备的准确度	14
10 试验要求	14
11 上屈服强度的测定	17
12 下屈服强度的测定	17
13 规定塑性延伸强度的测定	18
14 规定总延伸强度的测定	19
15 规定残余延伸强度的验证和测定	19
16 屈服点延伸率的测定	19
17 最大力塑性延伸率的测定	20
18 最大力总延伸率的测定	20
19 断裂总延伸率的测定	21
20 断后伸长率的测定	21
21 断面收缩率的测定	21
22 试验结果数值的修约	22
23 试验报告	22
24 测量不确定度	22
附录 A (资料性) 本文件与 ISO 6892-1:2019 结构变化对照一览表	29
附录 B (资料性) 本文件与 ISO 6892-1:2019 技术差异及其原因一览表	30
附录 C (资料性) 计算机控制拉伸试验机使用的建议	32
附录 D (规范性) 通过单轴拉伸试验测定金属材料的弹性模量	38
附录 E (规范性) 厚度 0.1 mm~<3 mm 薄板和薄带使用的试样类型	46
附录 F (规范性) 直径或厚度小于 4 mm 线材、棒材和型材使用的试样类型	48
附录 G (规范性) 厚度等于或大于 3 mm 板材和扁材以及直径或厚度等于或大于 4 mm 线材、棒材和	

型材使用的试样类型	49
附录 H (规范性) 管材使用的试样类型	53
附录 I (资料性) 考虑试验机系统变形情况补偿横梁位移速率的估算	56
附录 J (资料性) 逐步逼近方法测定规定塑性延伸强度(R_p)	57
附录 K (资料性) 卸力方法测定规定残余延伸强度($R_{m,2}$)举例	59
附录 L (资料性) 棒材、线材和条材等长产品的无缩颈塑性伸长率(A_{wn})的测定方法	60
附录 M (资料性) 断后伸长率低于 5%的测定方法	61
附录 N (资料性) 移位法测定断后伸长率	62
附录 O (资料性) 测量不确定度的评定	63
附录 P (资料性) 拉伸试验的精密度 根据实验室间试验方案的结果	67
参考文献	72

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。

本文件是 GB/T 228《金属材料 拉伸试验》的第 1 部分。GB/T 228 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：室温试验方法；
- 第 2 部分：高温试验方法；
- 第 3 部分：低温试验方法；
- 第 4 部分：液氮试验方法。

本文件代替 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》，与 GB/T 228.1—2010 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 增加了规范性引用文件 JJG 139、JJG 475、JJG 762、JJG 1063(见第 2 章)；
- b) 增加了“弹性模量”“默认值”“测定系数”3 个术语和定义(见第 3 章)；
- c) 增加了引伸计标距的选择(见第 8 章)；
- d) 增加了关于试验速率的一般信息(见 10.3.1)；
- e) 在基于应变速率的试验速率(方法 A)中增加了两种不同类型应变速率控制模式：方法 A1 和方法 A2，以及方法 A1 和方法 A2 的具体解释(见 10.3.2)；
- f) 增加了计算机兼容标准的代表(见 C.5)；
- g) 增加了规范性附录“通过单轴拉伸试验测定金属材料的弹性模量”(见附录 D)；
- h) 更改了纵向弧形试样(见表 H.1, 2010 年版的表 E.1)；
- i) 更改了考虑试验机系统变形情况补偿横梁位移速率的估算(见附录 I, 2010 年版的附录 F)；
- j) 将附录“逐步逼近方法测定规定塑性延伸强度(R_p)”由规范性附录改为资料性附录(见附录 J, 2010 年版的附录 J)；
- k) 更改了测量不确定度的评定(见附录 O, 2010 年版的附录 L)。

本文件修改采用 ISO 6892-1:2019《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》。

本文件与 ISO 6892-1:2019 相比，在结构上有较多调整，两个文件之间的结构变化对照一览表见附录 A。

本文件与 ISO 6892-1:2019 相比，存在较多技术差异，在所涉及的条款外侧页边空白位置用垂直单线(∟)进行了标示。这些技术性差异及其原因一览表见附录 B。

本文件做了下列编辑性修改：

- 增加了资料性附录“逐步逼近方法测定规定塑性延伸强度(R_p)”(见附录 J)；
- 增加了资料性附录“卸力方法测定规定残余延伸强度($R_{0.2}$)举例”(见附录 K)。

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、冶金工业信息标准研究院、深圳万测试验设备有限公司、江阴兴澄特种钢铁有限公司、中机试验装备股份有限公司、山西太钢不锈钢股份有限公司、南京钢铁股份有限公司、帕博检测技术服务有限公司、上海申力试验机有限公司、力试(上海)科学仪器有限公司、日钢营口中板有限公司、本钢板材股份有限公司、浙江省特种设备科学研究院、中钢集团郑州金属制品研究院股份有限公司、首钢集团有限公司、宝山钢铁股份有限公司、宣化钢铁集团有限责任公司、西王金属科技有

限公司、浙江金洲管道科技股份有限公司、国家钢铁及制品质量监督检验中心、齐齐哈尔华工机床股份有限公司、山东鑫大地控股集团有限公司、上海材料研究所、长沙戴卡科技有限公司、山东骏程金属科技有限公司、厦门市特种设备检验检测院、北京泰格瑞祥科技有限公司、建龙西林钢铁有限公司、承德建龙特殊钢有限公司、国合通用测试评价认证股份公司、西南铝业(集团)有限责任公司、鞍钢股份有限公司、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、董莉、刘涛、黄星、罗元东、龙建、王丽英、张华伟、徐亮、杨浩源、王斌、仲阳阳、达春娟、程东岳、何岩、邱宇、徐惟诚、王宏斌、毛帅帅、陈凯、黄飞、侯慧宁、王洪亮、付崇建、巴发海、刘军、孙谱、徐火力、董强、王永滨、张亚军、李璞、袁圣、吕丹、方健、李荣锋、吴益文、殷建军、刘斯家、白云、章森豹、贾元伟、梁才萌、李剑峰、田玉伟、张钊、师莉、贾建平、陈文斌、孙大勇、王滨、张红菊、李东宇、李洪光、邹志坚、谷峰、杨友、任永秀、张清水、李小君。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为:

- 1963年首次发布为 GB/T 228—1963,1976年第一次修订,1987年第二次修订;
- 2002年第三次修订时,并入了 GB/T 3076—1982《金属薄板(带)拉伸试验方法》与 GB/T 6397—1986《金属拉伸试验试样》的内容;
- 2010年第四次修订时,文件编号变更为 GB/T 228.1—2010;
- 本次为第五次修订。

引 言

GB/T 228《金属材料 拉伸试验》是金属材料力学试验中应用最广、关注度最高的试验方法标准，旨在规范不同温度范围金属材料的拉伸试验方法。

GB/T 228 由四部分构成。

——第 1 部分：室温试验方法。

——第 2 部分：高温试验方法。

——第 3 部分：低温试验方法。

——第 4 部分：液氮试验方法。

本文件提供了两种试验速率的控制方法。方法 A 为基于应变速率（包括横梁位移速率）的控制模式，方法 B 为基于应力速率的控制模式。方法 A 旨在减小测定应变速率敏感参数时试验速率的变化和减小试验结果的测量不确定度。由于材料的应变速率敏感性经常未知，最佳使用方法为方法 A。

注 1：基于本文件修订过程中关于试验速率的讨论，决定在今后标准的修订中推荐使用应变速率控制。

注 2：在下文中，“力”和“应力”或“延伸”“延伸百分比”和“应变”分别用于各种场合（作为图形轴标签或用于确定性能的说明）。然而，对于曲线上的一般描述或点，能分别互换“力”和“应力”或“延伸”“延伸百分比”和“应变”的名称。

金属材料 拉伸试验

第1部分:室温试验方法

1 范围

本文件规定了金属材料拉伸试验的定义、符号和说明、原理、试样及其尺寸测量、试验设备、试验要求、性能测定、测定结果数值修约和试验报告。

本文件适用于金属材料室温拉伸性能的测定。

注:附录C给出了计算机控制试验机的补充建议。

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 2975 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备(GB/T 2975—2018, ISO 377:2017, MOD)

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 16825.1 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 22066 静力单轴试验机用计算机数据采集系统的评定

JJG 139 拉力、压力和万能试验机检定规程

JJG 475 电子式万能试验机检定规程

JJG 762 引伸计检定规程

JJG 1063 电液伺服万能试验机检定规程

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

标距 gauge length

L

在测试的任一时刻,用于测量试样伸长的平行部分长度。

注:见参考文献[6]。

3.1.1

原始标距 original gauge length

L_0

室温下施力前的试样标距(3.1)。

注：见参考文献[6]。

3.1.2

断后标距 final gauge length after fracture

L_u

在室温下将断后的两部分试样紧密地对接在一起,保证两部分的轴线位于同一条直线上,测量试样断裂后的标距(3.1)。

注：见参考文献[6]。

3.2

平行长度 parallel length

L_p

试样平行缩减部分的长度。

注：对于未经机加工的试样,平行长度指未加工试样夹持部分之间的距离。见参考文献[6]。

3.3

伸长 elongation

试验期间任一时刻原始标距(3.1.1)的增量。

注：见参考文献[6]。

3.4

伸长率 percentage elongation

原始标距的伸长(3.3)与原始标距(L_0)(3.1.1)之比,以%表示。

注：见参考文献[6]。

3.4.1

残余伸长率 percentage permanent elongation

卸除指定的应力后,伸长与原始标距(L_0)(3.1.1)之比,以%表示。

注：见参考文献[6]。

3.4.2

断后伸长率 percentage elongation after fracture

A

断后标距的残余伸长(3.3)($L_u - L_0$)与原始标距(L_0)(3.1.1)之比,以%表示。

注：更详细的信息见 8.1、参考文献[6]。

3.5

引伸计标距 extensometer gauge length

L_e

用引伸计测量试样延伸(3.6)时所使用引伸计初始标距长度。

注1：对于测定(部分或全部)基于延伸的性能,例如 R_p , A_e 或 A_g ,使用引伸计是强制的。

注2：更详细的信息见 8.3、参考文献[6]。

3.6

延伸 extension

试验期间任一时刻引伸计标距(L_e)(3.5)的增量。

注：见参考文献[6]。

3.6.1

延伸率 percentage extension

应变 strain

e

标引符号说明：

- A —— 断后伸长率(从引伸计的信号测得的或者直接从试样上测得这一性能,见 20.1)；
- A_g —— 最大力塑性延伸率；
- A_{gt} —— 最大力总延伸率；
- A_t —— 断裂总延伸率；
- e —— 延伸率；
- m_E —— 应力-延伸率曲线上弹性部分的斜率；
- R —— 应力；
- R_m —— 抗拉强度；
- Δe —— 平台范围(测定 A_g , 见第 17 章；测定 A_{gt} , 见第 18 章)。

图 1 延伸的定义 (续)

3.6.6

断裂总延伸率 percentage total extension at fracture

A_t

断裂时刻的总延伸(3.6)(弹性延伸加塑性延伸)与引伸计标距(L_e)(3.5)之比,以%表示。

注: 见图 1。

3.7

试验速率 testing rate

试验期间使用的速率。

3.7.1

应变速率 strain rate

\dot{e}_{L_e}

用引伸计标距(L_e)(3.5)测量时单位时间的应变增加值。

3.7.2

平行长度应变速率的估计值 estimated strain rate over the parallel length

\dot{e}_{L_c}

根据横梁位移速率(3.7.3)和试样平行长度 L_c (3.2)计算的试样平行长度的应变单位时间内的增加值。

3.7.3

横梁位移速率 crosshead separation rate

ν_c

单位时间横梁位移的增加。

3.7.4

应力速率 stress rate

\dot{R}

单位时间应力(3.10)的增加。

注: 应力速率只用于方法 B 试验的弹性阶段(见 10.3.3)。

3.8

断面收缩率 percentage reduction of area

Z

断裂后试样横截面积的最大缩减量($S_u - S_0$)与原始横截面积(S_0)之比,以%表示:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100$$

3.9

最大力 maximum force

F_m

〈连续屈服的金属材料〉试验期间试样所承受的最大的力。

〈不连续屈服的金属材料〉在加工硬化开始之后,试样所承受的最大的力。

注1:对于呈现不连续屈服的材料,如果没有加工硬化,本文件不定义 F_m ,见图 8c) 的脚注。

注2:见图 8a) 和图 8b)。

3.10

应力 stress

R

试验期间任时刻的力与试样原始横截面积(S_0)之商。

注1:本文件中的应力是工程应力。

注2:见参考文献[6]。

3.10.1

抗拉强度 tensile strength

R_m

相应最大力(F_m)(3.9.2)对应的应力(3.10)。

注:见参考文献[6]。

3.10.2

屈服强度 yield strength

当金属材料呈现屈服现象时,在试验期间金属材料产生塑性变形而力不增加时的应力(3.10)点。

注:屈服强度区分上屈服强度和下屈服强度。见参考文献[6]。

3.10.2.1

上屈服强度 upper yield strength

R_{eH}

试样发生屈服而力首次下降前的最大应力(3.10)。

注:见图 2、参考文献[6]。

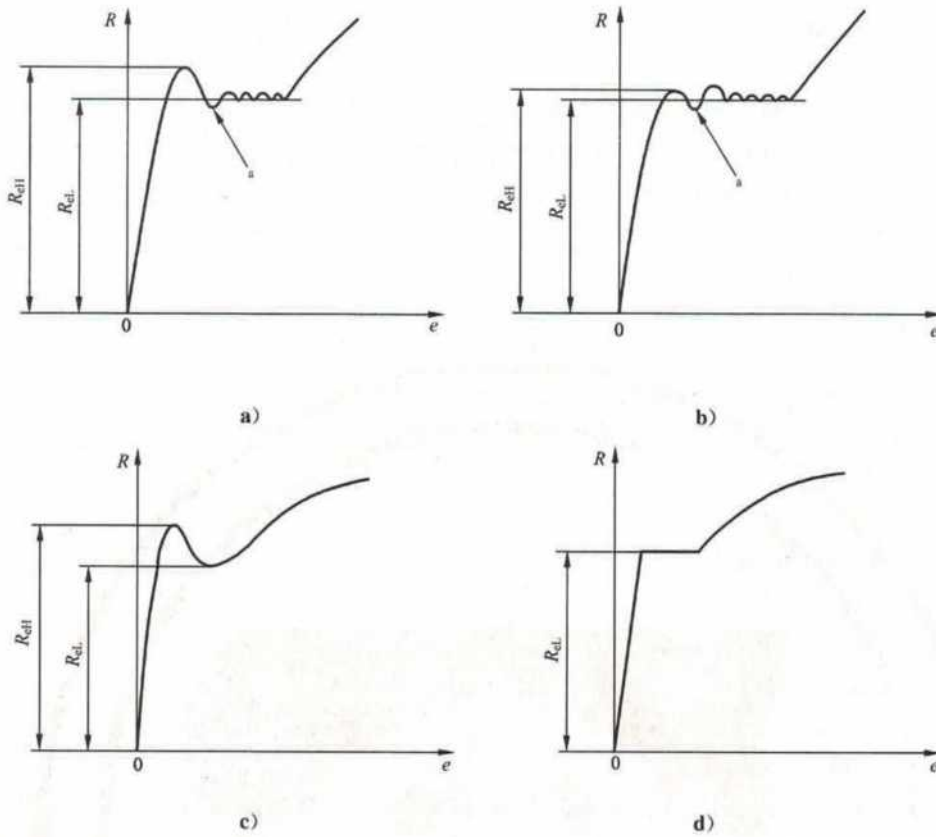
3.10.2.2

下屈服强度 lower yield strength

R_{eL}

在屈服期间,不计初始瞬时效应时的最小应力(3.10)。

注:见图 2、参考文献[6]。



标引符号说明：

e —— 延伸率；

R —— 应力；

R_{eH} —— 上屈服强度；

R_{eL} —— 下屈服强度。

* 初始瞬时效应。

图 2 不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度

3.10.3

规定塑性延伸强度 proof strength, plastic extension

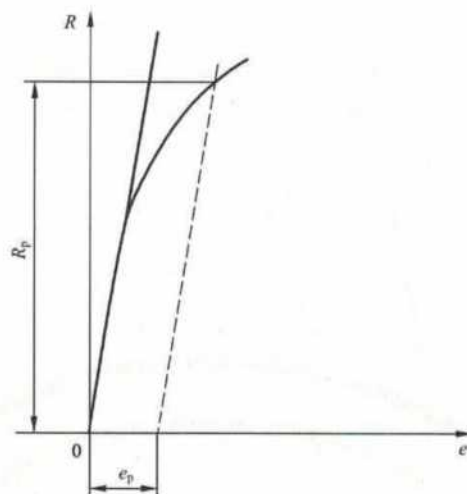
R_p

塑性延伸(3.6)等于规定的引伸计标距(L_e)(3.5)百分率时对应的应力(3.10)。

注 1: 改写 GB/T 24182—2009“规定塑性延伸强度”。

注 2: 使用的符号需附下脚标说明所规定的塑性延伸率,如 $R_{p0.2}$ 表示规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力。

注 3: 见图 3、参考文献[6]。



标引符号说明：

e —— 延伸率；

e_p —— 规定的塑性延伸率；

R —— 应力；

R_p —— 规定塑性延伸强度。

图 3 规定塑性延伸强度(R_p)(见 13.1)

3.10.4

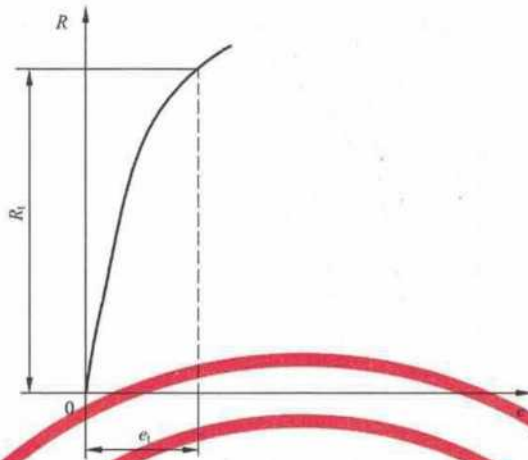
规定总延伸强度 proof strength, total extension

R_t

总延伸(3.6)等于规定的引伸计标距(L_e)(3.5)百分率时的应力(3.10)。

注 1：使用的符号需附下脚标说明所规定的总延伸率，如 $R_{t0.5}$ 表示规定总延伸率为 0.5% 时的应力。

注 2：见图 4、参考文献[6]。



标引符号说明：

e —— 延伸率；

e_t —— 规定总延伸率；

R —— 应力；

R_t —— 规定总延伸强度。

图 4 规定总延伸强度(R_t)

3.10.5

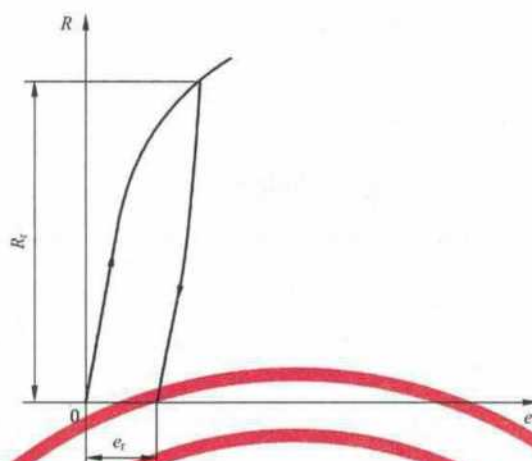
规定残余延伸强度 permanent set strength

R_r

力卸除后残余伸长(3.3)或延伸(3.6)等于规定的原始标距(L_0)(3.1.1)或引伸计标距(L_i)(3.5)百分率时对应的应力(3.10)。

注 1：使用的符号需附下脚标说明所规定的残余延伸率。如 $R_{r0.2}$ 表示规定残余延伸率为 0.2% 时的应力。

注 2：见图 5、参考文献[6]。



标引符号说明：

e —— 延伸率；

e_r —— 规定残余延伸率；

R —— 应力；

R_r —— 规定残余延伸强度。

图 5 规定残余延伸强度 (R_r)

3.11

断裂 fracture

当试样发生完全分离时的现象。

注：图 C.2 给出了一种计算机控制试验机用断裂的判断。

3.12

计算机控制的拉伸试验机 computer-controlled tensile testing machine

用于监控试验和测量，并由计算机进行数据采集和处理的机器。

3.13

弹性模量 modulus of elasticity

E

在弹性范围内应力变化 (ΔR) 和延伸率变化 (Δe) 的商乘以 100%。

$$E = \frac{\Delta R}{\Delta e} \times 100\%$$

注：用单位吉帕 (GPa) 报告弹性模量值，并参考 GB/T 8170 修约至 0.1 GPa。

3.14

默认值 default value

分别用于描述弹性模量 (3.13) 计算范围的应力 (3.10)、应变 (3.6.1) 的下限值或上限值。

3.15

测定系数 coefficient of determination

R^2

描述评估范围内应力-应变曲线质量的线性回归的附加结果。

注：使用的符号 R^2 是线性回归的数学表示，不是应力值平方的表达式。

4 符号和说明

本文件使用的符号和相应的说明见表 1。

表 1 符号和说明

符号	单位	说明
试样		
a_0, T_a^*	mm	矩形横截面试样原始厚度或原始管壁厚度
b_0	mm	矩形横截面试样平行长度的原始宽度或管的纵向剖条宽度或扁丝原始宽度
d_0	mm	圆形横截面试样平行长度的原始直径或圆丝原始直径或管的原始内径
D_0	mm	管原始外径
L_0	mm	原始标距
L_0'	mm	测定 A_{wn} 的原始标距(见附录 N)
L_e	mm	平行长度
L_e	mm	引伸计标距
L_t	mm	试样总长度
d_0	mm	圆形横截面试样断裂后缩颈处最小直径
L_u	mm	断后标距
L_u'	mm	测量 A_{wn} 的断后标距(见附录 N)
S_0	mm ²	原始横截面积
S_u	mm ²	断后最小横截面积
k	—	比例系数(见 6.1.1)
Z	%	断面收缩率
伸长率		
A	%	断后伸长率(见 3.4.2)
A_{wn}	%	无缩颈塑性伸长率(见附录 N)
延伸率		
A_e	%	屈服点延伸率
A_g	%	最大力(F_m)塑性延伸率
A_{gt}	%	最大力(F_m)总延伸率
A_t	%	断裂总延伸率
ΔL	mm	延伸
ΔL_m	mm	最大力总延伸
ΔL_t	mm	断裂总延伸

表 1 符号和说明 (续)

符号	单位	说明
速率		
$\dot{\epsilon}_{Lc}$	s^{-1}	应变速率
$\dot{\epsilon}_{Lc}$	s^{-1}	平行长度应变速率的估计值
\dot{R}	$MPa s^{-1}$	应力速率
v_c	$mm s^{-1}$	横梁位移速率
力		
F_m	N	最大力
屈服强度、规定强度、抗拉强度		
R	MPa^b	应力
R_{eH}	MPa^b	上屈服强度
R_{eL}	MPa	下屈服强度
R_m	MPa	抗拉强度
R_p	MPa	规定塑性延伸强度
R_r	MPa	规定残余延伸强度
R_t	MPa	规定总延伸强度
弹性模量、应力-延伸率曲线的斜率		
E	GPa	弹性模量 ^c
m	MPa	应力-延伸率曲线在给定试验时刻的斜率
m_E	MPa	应力-延伸率曲线弹性部分的斜率 ^d
R_1	MPa	较低应力值
R_2	MPa	较高应力值
e_1	%	较低应变值
e_2	%	较高应变值
R^2	—	测定系数
S_m	MPa	斜率的标准偏差 ^e
$S_{m(rel)}$	%	斜率的相对标准偏差 ^f
<p>^a 钢管产品标准中使用的符号。</p> <p>^b $1 MPa = 1 N \cdot mm^{-2}$。</p> <p>^c 弹性模量的计算在附录 D 说明, 不要求使用附录 D 在应力-延伸曲线上通过弹性部分斜率来测定规定塑性延伸强度。</p> <p>^d 应力-延伸率曲线的弹性部分的斜率值并不一定代表弹性模量。在最佳条件下, 弹性部分的斜率值与弹性模量值非常接近(见附录 D)。</p> <p>^e 线性回归的附加结果, 描述了评估范围内给定延伸值的应力值与最佳拟合线之间的差异。</p> <p>^f 评估范围内斜率的标准偏差与斜率的商乘以 100%。</p>		

5 原理

试验系用拉力拉伸试样,一般拉至断裂,测定第3章定义的一项或多项力学性能。

除非另有规定,试验应在10℃~35℃的室温进行。对于室温不满足上述要求的实验室,实验室应评估此类环境条件下运行的试验机对试验结果和/或校准数据的影响。当试验和校准活动超过10℃~35℃的要求时,应记录和报告温度。如果在试验和/或校准过程中存在较大温度梯度,测量不确定度可能上升以及可能出现超差情况。

对温度要求严格的试验,试验温度应为23℃±5℃。

如果要求测定弹性模量,应按附录D进行。

6 试样

6.1 形状与尺寸

6.1.1 一般要求

试样的形状与尺寸取决于被试验金属产品的形状与尺寸。

通常从产品、压制坯或铸件切取样坯经机加工制成试样。但具有等横截面的产品(型材、棒材、线材等)和铸造试样(铸铁和铸造非铁合金)可不经机加工而进行试验。

试样横截面可为圆形、矩形、多边形、环形,特殊情况下可为某些等截面形状。

试样原始标距与横截面积有 $L_0 = k \sqrt{S_0}$ 关系者称为比例试样。国际上使用的比例系数(k)的值为5.65。原始标距应不小于15 mm。当试样横截面积太小,以致采用比例系数(k)为5.65的值不能符合这一最小标距要求时,可以采用较高的比例系数(优先采用11.3)或采用非比例试样。

注:选用小于20 mm标距的试样,测量断后伸长率不确定度可能增加。

非比例试样其原始标距(L_0)与原始横截面积(S_0)无关。

试样的尺寸公差应符合附录E~附录H的相应规定(见6.2)。

经与客户协商一致,也可使用其他试样,如有关产品标准中规定的其他试样,如GB/T 9711、GB/T 19830等。

6.1.2 机加工的试样

如试样的夹持端与平行长度的尺寸不相同,它们之间应以过渡弧连接。若在相应的附录(见6.2)中对过渡半径未作规定时,建议在相关产品标准中规定。

试样夹持端的形状应适合试验机的夹头。试样轴线应与力的作用线重合。

试样平行长度 L_1 或试样不具有过渡弧时夹头间的自由长度应大于原始标距(L_0)。

6.1.3 不经机加工的试样

如试样为未经机加工的产品的一段长度或试棒,两夹头间的长度应足够,以使原始标距的标记与夹头有合理的距离(见附录E~附录H)。

铸造试样应在其夹持端和平行长度之间以过渡弧连接。此弧的过渡半径尺寸可能很重要,建议在相关产品标准中规定。试样夹持端的形状应适合于试验机的夹头,试样轴线应与力的作用线重合。平行长度(L_1)应大于原始标距(L_0)。

6.2 试样类型

附录E~附录H中按产品的形状规定了试样的主要类型,见表2。相关产品标准也可规定其他试


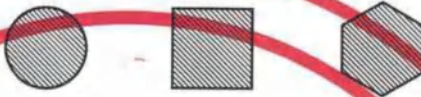
样类型。

6.3 试样的制备

应按照不同材料的相关产品标准要求截取样坯和制备试样,如钢产品应符合 GB/T 2975 的要求。

表 2 试样的主要类型

单位为毫米

产品类型		附录	
薄板、板材、扁材	线材、棒材、型材		
		附录	
厚度(a)	直径或边长		
$0.1 \leq a < 3$	—		E
—	< 4		F
$a \geq 3$	≥ 4		G
管材		H	

7 原始横截面积的测定

宜在试样平行长度区域以足够的点数测量试样的相关尺寸。

建议测量试样横截面积时,在试样平行长度区域最少三个不同位置进行测量。

原始横截面积(S_0)是根据测量的实际尺寸计算横截面积的平均值。

原始横截面积的计算准确度取决于试样类型。附录 E~附录 H 给出了不同类型试样原始横截面积 S_0 的评估方法,并提供了测量准确度的详细说明。

用于测量原始横截面积的所有测量装置应按照适当的能溯源至国家测量系统的参考标准进行校准。

8 原始标距和引伸计标距

8.1 原始标距的选择

对于比例试样,若原始标距不为 $5.65\sqrt{S_0}$ (其中 S_0 为平行长度的原始横截面积),符号 A 宜附以下脚标说明所使用的比例系数。例如, $A_{11.3}$ 表示按照公式(1)计算的原始标距(L_0)的断后伸长率。

$$L_0 = 11.3\sqrt{S_0} \dots\dots\dots(1)$$

注: $5.65\sqrt{S_0} = 5\sqrt{4S_0/\pi}$

对于非比例试样(见附录 E 和附录 G),符号 A 宜附以下脚标说明所使用的原始标距(以毫米表示)。例如, $A_{80\text{ mm}}$ 表示原始标距(L_0)为 80 mm 的断后伸长率。

8.2 原始标距的标记

对于断后伸长率 A 的手动测定,原始标距 L_0 的两端应使用细小的点或线进行标记,但不能使用引

起过早断裂的标记。原始标距应以 $\pm 1\%$ 的准确度标记。

对于比例试样,如果原始标距的计算值与其标记值之差小于 $10\%L_0$,可将原始标距的计算值按 GB/T 8170 修约至最接近 5 mm 的倍数。

如平行长度(L_c)比原始标距长许多,例如不经机加工的试样,可以标记一系列套叠的原始标距。有时,可以在试样表面划一条平行于试样纵轴的线,并在此线上标记原始标距。

8.3 引伸计标距的选择

对于测定屈服强度和规定强度性能, L_e 宜尽可能覆盖试样平行长度。这将保证引伸计检测到发生在试样上的全部屈服。理想的 L_e 应大于 $0.5L_c$ 但小于约 $0.9L_c$ 。最大力时或在最大力之后的性能,推荐 L_e 等于 L_c 或近似等于 L_c ,但测定断后伸长率时 L_e 应等于 L_0 。

9 试验设备的准确度

试验机的测力系统应满足 GB/T 16825.1 要求,并按照 JJG 139、JJG 475 或 JJG 1063 进行校准,并且其准确度应为 1 级或优于 1 级。

引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160 的要求并按照 JJG 762 进行校准。测定上屈服强度、下屈服强度、屈服点延伸率、规定塑性延伸强度、规定总延伸强度、规定残余延伸强度,以及规定残余延伸强度的验证试验,应使用 1 级或优于 1 级准确度的引伸计;测定其他具有较大延伸率(延伸大于 5%)的性能,例如抗拉强度、最大力总延伸率、最大力塑性延伸率、断裂总延伸率,以及断后伸长率,可使用 2 级或优于 2 级准确度的引伸计。

计算机控制拉伸试验机应满足 GB/T 22066 的要求,附录 C 的建议可供参考。

注:合适的拉伸试验机根据试验机力值校准范围和试样尺寸选取。

10 试验要求

10.1 设定试验力零点

在试验加载链装配完成后,试样两端被夹持之前,应设定力测量系统的零点。一旦设定了力值零点,在试验期间力值测量系统不应再发生变化。

注:上述方法一方面是为了确保夹持系统的重量在测力时得到补偿,另一方面是为了保证夹持过程中产生的力不影响力值的测量。

10.2 试样的夹持方法

应使用例如楔形夹具、螺纹夹具、平推夹具、套环夹具等合适的夹具夹持试样。

宜确保夹持的试样受轴向拉力的作用,尽量减小弯曲(例如更多的信息在 ASTM E1012 中给出,见参考文献[14])。这对试验脆性材料或测定规定塑性延伸强度、规定总延伸强度、规定残余延伸强度或屈服强度时尤为重要。

为了确保试样与夹头对中,可施加不超过规定强度或预期屈服强度的 5% 相应的预拉力。宜对预拉力的延伸影响进行修正。

10.3 试验速率

10.3.1 关于试验速率的一般信息

除非另有规定,只要满足本文件的要求,方法 A1、方法 A2 或方法 B,以及试验速率的选择由样品提

供者或其指定实验室来决定。

注1：方法A和方法B的区别在于方法A要求的试验速率定义在感兴趣点(例如 $R_{p0.2}$)，也是要测定的性能；而方法B要求的试验速率一般被设定在测定的性能之前的弹性范围。

在方法B的某个条件下(例如对某些钢在弹性范围应力速率大约30 MPa/s,使用高刚度的夹持系统和附录E表E.2中的P6试样),方法A的范围2的应变速率可被观测到。

注2：产品标准和相关试验标准(例如航空标准)或协议可能规定与本文件不同的试验速率。

10.3.2 基于应变速率的试验速率(方法A)

10.3.2.1 通则

方法A是为了减小测定应变速率敏感参数(性能)时的试验速率变化和试验结果的测量不确定度。本文件阐述了两种不同类型的应变速率控制模式。

——方法A1闭环,应变速率($\dot{\epsilon}_{Lc}$)是基于引伸计的反馈而得到。

——方法A2开环,应变速率 $\dot{\epsilon}_{Lc}$ 是根据平行长度估计的,即通过控制平行长度与需要的应变速率相乘得到的横梁位移速率[见公式(2)]来实现。

注：方法A2更严谨的应变速率估算程序的描述见附录I。

如果材料展示出不连续屈服或锯齿状屈服(如某些钢和AlMg合金在屈服阶段或如某些材料呈现出的Portevin-LeChatelier锯齿屈服效应)或发生缩颈时,力值能保持名义的恒定,应变速率($\dot{\epsilon}_{Lc}$)和根据平行长度估计的应变速率($\dot{\epsilon}_{Lc}$)大致相等。如果材料显示出均匀变形能力,两种速率之间会存在不同。随着力值的增加,试验机系统的柔度可能会导致实际的应变速率明显低于应变速率的设定值。

试验速率应满足下列要求。

- 除非另有规定,否则可以用任何方便的试验速率达到相当于预期屈服强度一半的应力。此后直至测定 R_{eH} 、 R_p 或 R_t 的范围,应按照规定应变速率($\dot{\epsilon}_{Lc}$),[或方法A2根据平行长度估计的横梁位移速率(ν_c)]。这一范围需要在试样上装夹引伸计测量试样延伸,消除拉伸试验机柔度的影响,以准确控制应变速率。对于不能进行应变速率控制的试验机,方法A2也可用。
- 在不连续屈服期间,应选用平行长度应变速率的估计值($\dot{\epsilon}_{Lc}$),见3.7.2。在这一范围是不可能用装夹在试样上的引伸计来控制应变速率的,因为局部的塑性变形可能发生在引伸计标距以外。使用按公式(2)计算的恒定横梁位移速率(ν_c),在这一范围可以保持要求的平行长度应变速率的估计值足够准确。

$$\nu_c = L_c \times \dot{\epsilon}_{Lc} \quad \dots\dots\dots (2)$$

- 在测定了 R_p 、 R_t 或屈服结束后的范围(见3.7.2),应该使用 $\dot{\epsilon}_{Lc}$ 或 $\dot{\epsilon}_{Lc}$ 。推荐使用 $\dot{\epsilon}_{Lc}$,以避免由于缩颈发生在引伸计标距以外而引起试验机控制问题。

在测定相关材料性能时,应保持10.3.2.2至10.3.2.4规定的应变速率(见图9)。

在进行应变速率或控制模式转换时,不宜在应力-延伸率曲线上引入不连续性,而歪曲 R_m 、 A_g 或 A_{gt} 值(见图10)。这种不连续效应可以通过渐近的转换速率方式得以减轻。

应力-延伸率曲线在应变硬化阶段的形状可能受应变速率的影响,宜记录下采用的试验速率(见10.3.4)。

10.3.2.2 测定上屈服强度(R_{eH})或规定延伸强度(R_p 、 R_t 和 R_r)的应变速率

在测定 R_{eH} 、 R_p 、 R_t 和 R_r 时,应变速率($\dot{\epsilon}_{Lc}$)应尽可能保持恒定。在测定这些性能时, $\dot{\epsilon}_{Lc}$ 应选用下面两个范围之一(见图9):

——范围1: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0.000\ 07\ s^{-1}$,相对偏差 $\pm 20\%$;

——范围2: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0.000\ 25\ s^{-1}$,相对偏差 $\pm 20\%$ (如果没有其他规定,推荐选取该速率)。

如果试验机不能直接进行应变速率控制,应采用方法 A2。

10.3.2.3 测定下屈服强度(R_{el})和屈服点延伸率(A_g)的应变速率

上屈服强度之后,在测定下屈服强度和屈服点延伸率时,应保持下列两种范围之一的平行长度应变速率的估计值($\dot{\epsilon}_{lc}$)范围(见图 9),直到不连续屈服结束。

- 范围 2: $\dot{\epsilon}_{lc}=0.000\ 25\ s^{-1}$,相对偏差±20%(测定 R_{el} 时推荐该速率);
- 范围 3: $\dot{\epsilon}_{lc}=0.002\ s^{-1}$,相对偏差±20%。

10.3.2.4 测定抗拉强度(R_m),断后伸长率(A),最大力下的总延伸率(A_{gt}),最大力下的塑性延伸率(A_g)和断面收缩率(Z)的应变速率

在测定屈服强度或塑性延伸强度后,根据试样平行长度估计的应变速率($\dot{\epsilon}_{lc}$)在下述范围中(见图 9):

- 范围 2: $\dot{\epsilon}_{lc}=0.000\ 25\ s^{-1}$,相对偏差±20%;
- 范围 3: $\dot{\epsilon}_{lc}=0.002\ s^{-1}$,相对偏差±20%;
- 范围 4: $\dot{\epsilon}_{lc}=0.006\ 7\ s^{-1}$,相对偏差±20%($0.4\ min^{-1}$,相对偏差±20%) (如果没有其他规定,推荐选取该速率)。

如果拉伸试验只测定抗拉强度,范围 3 或范围 4 内的任一平行长度应变速率的估计值($\dot{\epsilon}_{lc}$)可适用于整个试验。

10.3.3 基于应力速率的试验速率(方法 B)

10.3.3.1 通则

试验速率取决于材料特性并应符合 10.3.3.2.1~10.3.3.2.5 和 10.3.3.3。如果没有其他规定,在应力达到规定屈服强度的一半之前,可以采用任意的试验速率。超过这点以后的试验速率应满足 10.3.3.2.1~10.3.3.2.5 和 10.3.3.3 的规定。

注:这里的方法 B 的意图并非保持恒定的应力速率或闭环载荷控制的应力速率控制去测定屈服性能,而只是设定横梁位移速率以实现在弹性区域的目标应力速率,见表 3。当被测试样开始屈服时,应力速率减小,甚至当试样发生不连续屈服时可能变成负值。企图在屈服过程中保持一个恒定的应力速率需要试验机运行到一个相当高的速率,在大多数情况下是不现实的也是不需要的。

10.3.3.2 测定屈服强度和规定强度的试验速率

10.3.3.2.1 上屈服强度(R_{eH})

试验机横梁位移速率应尽可能保持恒定,并使相应的应力速率在表 3 规定的范围内。

注:弹性模量小于 150 GPa 的典型材料包括锰、铝合金、铜和钛。弹性模量大于 150 GPa 的典型材料包括铁、钢、钨和镍基合金。

表 3 应力速率

材料弹性模量(E)/GPa	应力速率(\dot{R})/(MPa·s ⁻¹)	
	最小	最大
<150	2	20
≥150	6	60

10.3.3.2.2 下屈服强度(R_{eL})

如仅测定下屈服强度,在试样平行长度的屈服期间应变速率应在 $0.000\ 25/s \sim 0.002\ 5/s$ 之间。平行长度内的应变速率应尽可能保持恒定。如不能直接调节这一应变速率,应通过调节屈服即将开始前的应力速率来调整,在屈服完成之前不再调节试验机的控制。

任何情况下,弹性范围内的应力速率不应超过表 3 规定的最大速率。

10.3.3.2.3 上屈服强度(R_{eH})和下屈服强度(R_{eL})

如在同一试验中测定上屈服强度和下屈服强度,应满足测定下屈服强度的条件,见 10.3.3.2.2。

10.3.3.2.4 规定塑性延伸强度(R_p)、规定总延伸强度(R_T)和规定残余延伸强度(R_r)

在弹性范围试验机的横梁位移速率应在表 3 规定的应力速率范围内,并尽可能保持恒定。直至规定强度(规定塑性延伸强度、规定总延伸强度和规定残余延伸强度)此横梁位移速率应保持任何情况下应变速率不应超过 $0.002\ 5\ s^{-1}$ 。

10.3.3.2.5 横梁位移速率

如试验机无能力测量或控制应变速率,应采用等效于表 3 规定的应力速率的试验机横梁位移速率,直至屈服完成。

10.3.3.3 测定抗拉强度(R_m)、断后伸长率(A)、最大力总延伸率(A_{gt})、最大力塑性延伸率(A_g)和断面收缩率(Z)的试验速率

测定屈服强度或塑性延伸强度后,试验速率可以增加到大于 $0.008\ s^{-1}$ 的应变速率(或等效的横梁位移速率)。

如果仅需要测定材料的抗拉强度,在整个试验过程中可选取不超过 $0.008\ s^{-1}$ 的单一试验速率。

10.3.4 试验条件的表示

为了用简单的形式报告试验控制模式和试验速率,可以使用下列缩写的表示形式:

GB/T 228.1 A nmn 或 GB/T 228.1 B n

这里“A”定义为使用方法 A(基于应变速率的控制模式)，“B”定义为使用方法 B(基于应力速率的控制模式)。方法 A 中的符号“ nmn ”是指每个试验阶段所用速率,如图 9 中定义的;方法 B 中的符号“ n ”是指在弹性阶段所选取的应力速率。

示例 1: GB/T 228.1 A224 定义试验为基于应变速率的控制模式,不同阶段的试验速率范围分别为 2, 2 和 4。

示例 2: GB/T 228.1 B30 定义试验为基于应力速率的控制模式,试验的名义应力速率为 $30\ MPa \cdot s^{-1}$ 。

示例 3: GB/T 228.1 B 定义试验为基于应力速率的控制模式,试验的名义应力速率符合表 3。

11 上屈服强度的测定

上屈服强度(R_{eH})可从力-延伸曲线图或峰值力显示器上测得,定义为力首次下降前的最大力值对应的应力。 R_{eH} 由该力除以试样的原始横截面积计算得到(见图 2)。

12 下屈服强度的测定

下屈服强度(R_{eL})可以从力-延伸曲线图测得,定义为不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最小力所

对应的应力。 R_{eL} 由该力除以试样的原始横截面积计算得到(见图2)。

对于上、下屈服强度位置判定的基本原则如下。

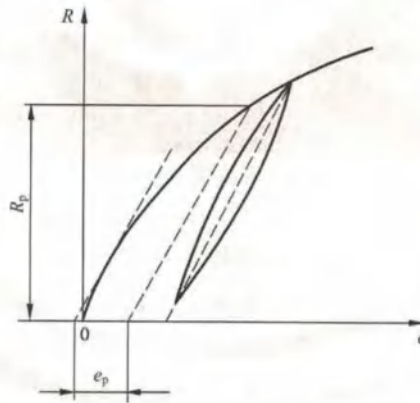
- 屈服前的第1个峰值应力(第1个极大值应力)判为上屈服强度,不管其后的峰值应力比它大或比它小。
- 屈服阶段中如呈现两个或两个以上的谷值应力,舍去第1个谷值应力(第1个极小值应力)不计,取其余谷值应力中之最小者判为下屈服强度。如只呈现1个下降谷,此谷值应力判为下屈服强度。
- 屈服阶段中呈现屈服平台,平台应力判为下屈服强度;如呈现多个而且后者高于前者的屈服平台,判第1个平台应力为下屈服强度。
- 正确的判定结果是下屈服强度低于上屈服强度。

在材料呈现明显屈服且不需测定屈服点延伸率的情况下:为提高试验效率,可以报告在上屈服强度之后延伸率为0.25%范围以内的最低应力为下屈服强度,不考虑任何初始瞬时效应。用此方法测定下屈服强度后,试验速率可以按照10.3.2.4或10.3.3.3增加。试验报告应注明使用了此简捷方法。

13 规定塑性延伸强度的测定

13.1 根据力-延伸曲线图测定规定塑性延伸强度(R_p)。在曲线图上,画一条与曲线的弹性直线段部分平行的直线,且在延伸轴上弹性直线段部分与此直线的距离等于规定塑性延伸率,例如0.2%。此平行线与曲线的交截点给出相应于所求规定塑性延伸强度的力。此力除以试样原始横截面积(S_0)得到规定塑性延伸强度(见图3)。

如力-延伸曲线图的弹性直线部分不能明确地确定,以致不能以足够的准确度划出这一平行线,推荐采用如下方法(见图6)。



标引符号说明:

e —— 延伸率;

e_p —— 规定塑性延伸率;

R —— 应力;

R_p —— 规定塑性延伸强度。

图6 规定塑性延伸强度(R_p)(见13.1)

试验时,当已超过预期的规定塑性延伸强度后,将力降至约为已达到的力的10%。然后再施加力直至超过原已达到的力。为了测定规定塑性延伸强度,过滞后环两端点画一直线。然后经过横轴上与曲线原点的距离等效于所规定的塑性延伸率的点,作平行于此直线的平行线。平行线与曲线的交截点

给出相应于规定塑性延伸强度的力。此力除以试样原始横截面积得到规定塑性延伸强度(见图 6)。

注:修正曲线的原点能够使用各种方法。划一条平行于滞后环所确定的直线的平行线并使其与力-延伸曲线相切,此平行线与延伸轴的交截点即为曲线的修正原点(见图 6)。

宜注意保证在力降低开始点的塑性应变只略微高于规定的塑性延伸强度(R_p)。较高应变的开始点将会降低通过滞后环获得直线的斜率。

如果在产品标准中没有规定或得到客户的同意,在不连续屈服期间或之后测定规定塑性延伸强度是不合适的。

13.2 通过使用自动处理装置(例如微处理机等)或自动测试系统可不绘制力-延伸曲线图测定规定塑性延伸强度(见附录 C)。

13.3 可采用附录 J 提供的逐步逼近方法测定规定塑性延伸强度。

14 规定总延伸强度的测定

14.1 在力-延伸曲线图上,划一条平行于力轴并与该轴的距离等效于规定总延伸率的平行线,此平行线与曲线的交截点给出相应于规定总延伸强度的力,此力除以试样原始横截面积(S_0)得到规定总延伸强度 R_t (见图 4)。

14.2 可使用自动处理装置(例如微处理机等)或自动测试系统测定规定总延伸强度,可以不绘制力-延伸曲线图(见附录 C)。

15 规定残余延伸强度的验证和测定

试样施加相应于规定残余延伸强度的力,保持力 10 s~12 s,卸除力后验证残余延伸率未超过规定百分率(见图 5)。

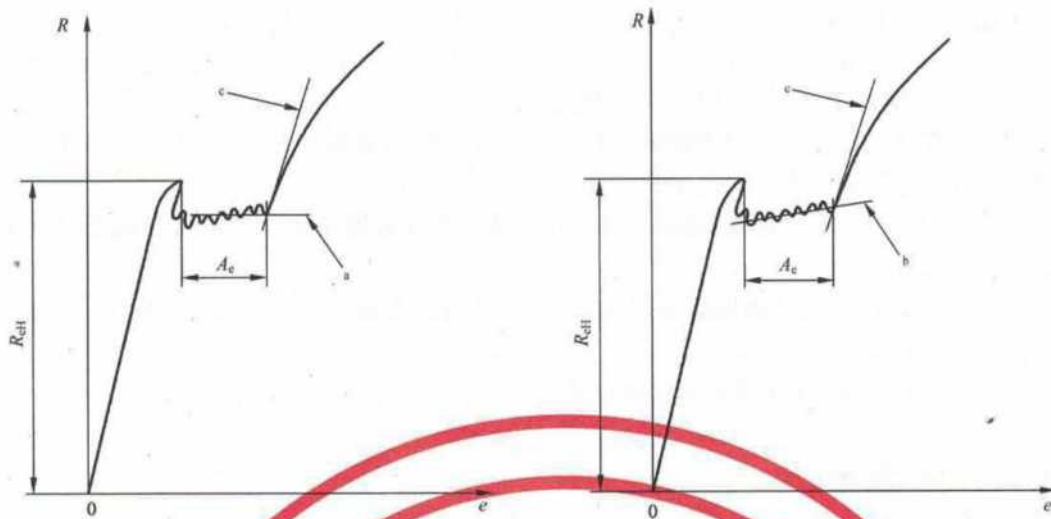
注:这个验证试验是检查通过或未通过的试验,通常不作为标准拉伸试验的一部分。对试样施加应力,允许的残余延伸由相关产品标准(或试验委托方)来规定。例如:报告“ $R_{0.5} = 750$ MPa 通过”意思是对试样施加 750 MPa 的应力,产生的残余延伸小于或等于 0.5%。

如为了得到规定残余延伸强度的具体数值,应进行测定,附录 K 提供了测定规定残余延伸强度的例子。

16 屈服点延伸率的测定

对于不连续屈服的材料,从力-延伸曲线图上均匀加工硬化开始点的延伸减去上屈服强度(R_{eH})对应的延伸得到屈服点延伸率(A_e)。均匀加工硬化开始点的延伸通过在曲线图上,经过不连续屈服阶段最后的最小值点划一条水平线或经过均匀加工硬化前屈服范围的回归线,与均匀加工硬化开始处曲线的最高斜率线相交点确定。屈服点延伸除以引伸计标距(L_0)得到屈服点延伸率(见图 7)。

试验报告宜注明确定均匀加工硬化开始点的方法[见图 7a)或 b)]。



a) 水平线法

b) 回归线法

标引符号说明：

A_e —— 屈服点延伸率；

e —— 延伸率；

R —— 应力；

R_{eH} —— 上屈服强度。

^a 经过均匀加工硬化前最后最小值点的水平线。

^b 经过均匀加工硬化前屈服范围的回归线。

^c 均匀加工硬化开始处曲线的最高斜率线。

图 7 屈服点延伸率(A_e)的不同评估方法

17 最大力塑性延伸率的测定

在用引伸计得到的力-延伸曲线图上从最大力时的总延伸中扣除弹性延伸部分即得到最大力时的塑性延伸，将其除以引伸计标距得到最大力塑性延伸率。

最大力塑性延伸率(A_g)按照公式(3)进行计算：

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_e} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (3)$$

注：有些材料在最大力时呈现一平台。当出现这种情况，取最大力平台中点对应的塑性延伸率(见图1)。

有些材料其最大力塑性延伸率不等于无缩颈塑性延伸率，对于棒材、线材和条材等长产品，可采用附录 L 的中方法测定无缩颈塑性延伸率(A_{wn})。

18 最大力总延伸率的测定

在用引伸计得到的力-延伸曲线图上测定最大力总延伸。最大力总延伸率(A_{gt})按照公式(4)计算：

$$A_{gt} = \frac{\Delta L_m}{L_e} \times 100 \quad \dots\dots\dots (4)$$

注：有些材料在最大力时呈现一平台。当出现这种情况，取最大力平台中点对应的总延伸率(见图1)。

19 断裂总延伸率的测定

在用引伸计得到的力-延伸曲线图上测定断裂总延伸。断裂总延伸率(A_t)按照公式(5)计算:

$$A_t = \frac{\Delta L_t}{L_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(5)$$

20 断后伸长率的测定

20.1 应按照 3.4.2 的定义测定断后伸长率。

为了测定断后伸长率,应将试样断裂的部分仔细地配接在一起使其轴线处于同一直线上,并采取特别措施确保试样断裂部分适当接触后测量试样断后标距。这对小横截面试样和低伸长率试样尤为重要。

按公式(6)计算断后伸长率(A):

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(6)$$

应使用分辨力足够的量具或测量装置测定断后伸长量($L_u - L_0$),并准确到±0.25 mm。

如规定的最小断后伸长率小于5%,建议采取特殊方法进行测定(见附录 M)。原则上只有断裂处与最接近的标距标记的距离不小于原始标距的三分之一情况方为有效。但断后伸长率大于或等于规定值,不管断裂位置处于何处测量均为有效。如断裂处与最接近的标距标记的距离小于原始标距的三分之一时,可采用附录 N 规定的移位法测定断后伸长率。

20.2 能用引伸计测定断裂延伸的试验机,引伸计标距应等于试样原始标距,无需标出试样原始标距的标记。以断裂时的总延伸作为伸长测量时,为了得到断后伸长率,应从总延伸中扣除弹性延伸部分。为了得到与手工方法可比的结果,有一些额外的要求(例如,引伸计高的动态响应和频带宽度,见 C.2.2)。

原则上,断裂发生在引伸计标距(L_e)以内方为有效,但断后伸长率等于或大于规定值,不管断裂位置处于何处测量均为有效。如产品标准规定用一固定标距测定断后伸长率,引伸计标距应等于这一标距。

20.3 试验前通过协议,可以在一固定标距上测定断后伸长率,然后使用换算式或换算表将其换算成比例标距的断后伸长率(例如可以使用 GB/T 17600.1 和 GB/T 17600.2 的换算方法)。

注:仅当标距或引伸计标距、横截面的形状和面积均为相同时,或当比例系数(k)相同时,断后伸长率才具有可比性。

21 断面收缩率的测定

应根据 3.8“断面收缩率”术语的定义测定断面收缩率。

如必要,应将试样断裂部分仔细地配接在一起,使其轴线处于同一直线上。

对于圆形试样,测量相互垂直两个方向上的直径取其平均值计算最小横截面积(S_u)。

在进行读数时,应注意确保断裂面没有移位。

按照公式(7)计算断面收缩率:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(7)$$

建议断裂后最小横截面积的测定准确到±2%(见图 13)。

对于小直径的圆试样或其他横截面形状的试样,断后横截面积的测量准确度达到±2%很困难。

22 试验结果数值的修约

试验测定的性能结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约。如未规定具体要求,应根据 GB/T 8170 按如下要求进行修约:

- 强度性能值修约至 1MPa;
- 屈服点延伸率修约至 0.1%,其他延伸率和断后伸长率修约至 0.5%;
- 断面收缩率修约至 1%。

23 试验报告

试验报告应至少包括以下信息,除非双方另有约定:

- a) 本文件编号;
- b) 试验条件信息(如 10.3.4 的要求);
- c) 试样标识;
- d) 材料名称、牌号(如已知);
- e) 试样类型;
- f) 试样的取样方向和位置(如已知);
- g) 试验控制模式和试验速率或试验速率范围(见 10.3.1),如果与 10.3.2 和 10.3.3 推荐的方法不同;
- h) 试验结果。

24 测量不确定度

24.1 总则

测量不确定度分析对于辨识测量结果不一致性的主要来源是很有用的。

基于本文件得到的产品标准和材料性能的数据库以及较早版本的 GB/T 228 对测量不确定度都有内在的贡献。因此根据测量不确定度做进一步的调整是不恰当的,为了顺从失效产品而冒险也是不恰当的。正因为此,按照附录 O 和附录 P 步骤推导出来的不确定度的估计值也仅仅是个参考值,除非客户特别指明。

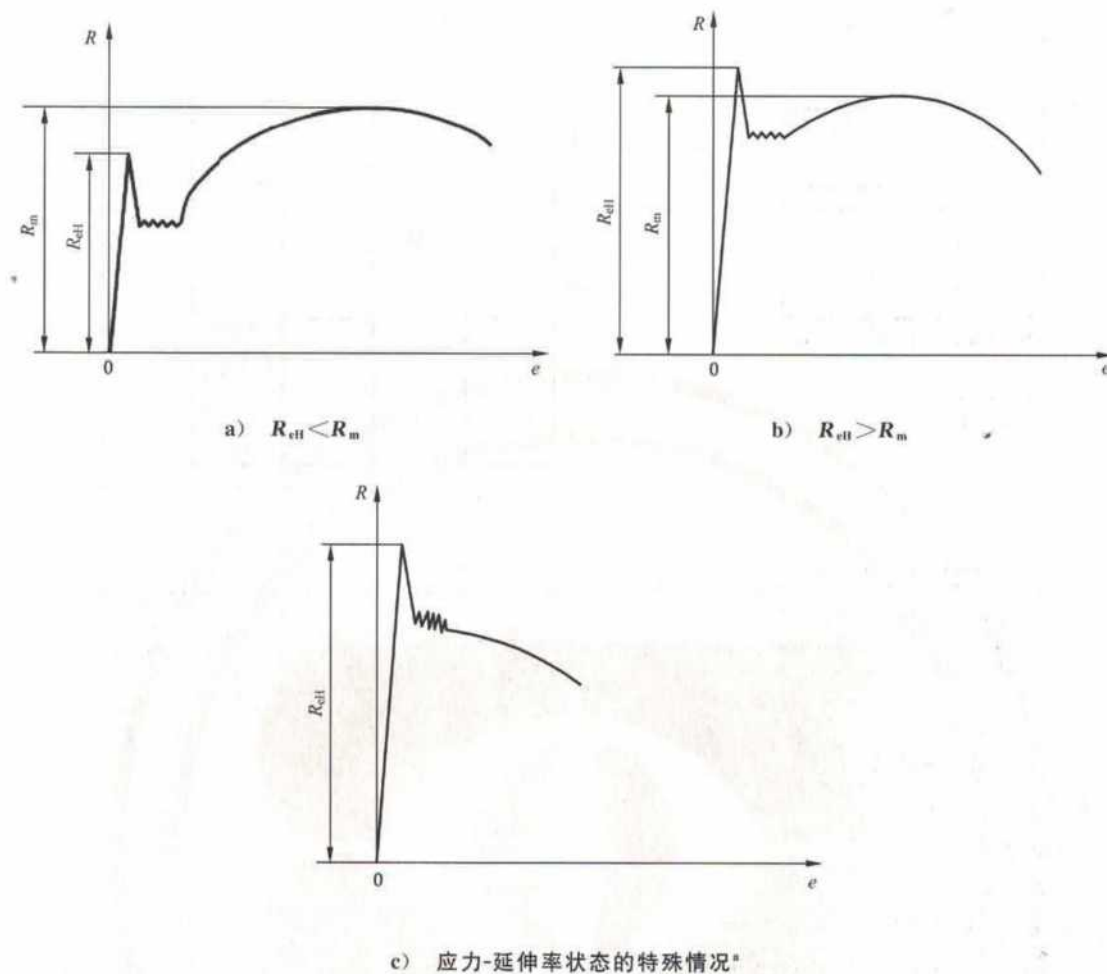
24.2 试验条件

本文件规定的试验条件和极限不应根据考虑测量不确定度而调整,除非客户特别指明。

24.3 试验结果

估计的测量不确定度不应与测量结果组合来评判是否满足产品标准要求,除非客户特别指明。

有关不确定度见附录 O 和附录 P,附录 O 提供了与溯源参数相关的不确定度的评定指南,附录 P 提供了一组钢和铝合金实验室间的比对结果来测定不确定度的指南。



标引符号说明：

e —— 延伸率；

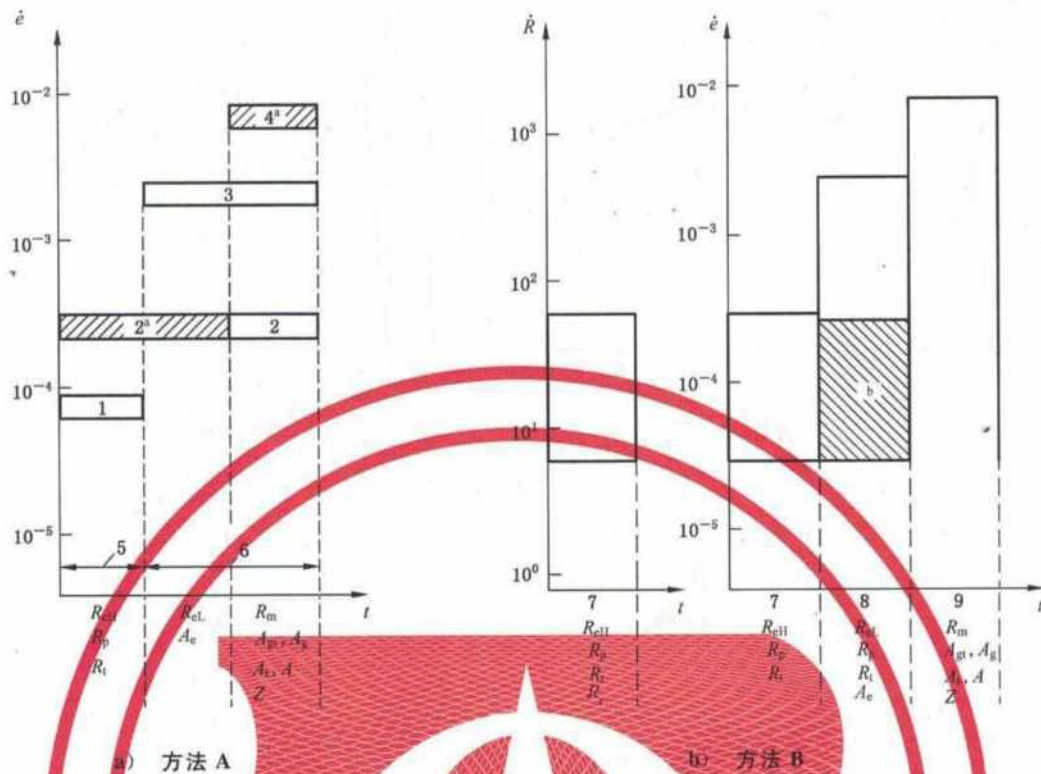
R —— 应力；

R_{eH} —— 上屈服强度；

R_m —— 抗拉强度。

* 呈现图 8 c) 应力-延伸率状态的材料, 按照本文件无确定的抗拉强度。双方可以另做协议。

图 8 从应力-延伸率曲线测定抗拉强度(R_m)的几种不同类型



标引符号与序号说明：

$\dot{\epsilon}$ ——应变速率；

\dot{R} ——应力速率；

t ——拉伸试验时间进程；

1 ——范围 1: $\dot{\epsilon} = 0.000\ 07\ \text{s}^{-1}$, 相对误差 $\pm 20\%$ ；

2 ——范围 2: $\dot{\epsilon} = 0.000\ 25\ \text{s}^{-1}$, 相对误差 $\pm 20\%$ ；

3 ——范围 3: $\dot{\epsilon} = 0.002\ \text{s}^{-1}$, 相对误差 $\pm 20\%$ ；

4 ——范围 4: $\dot{\epsilon} = 0.006\ 7\ \text{s}^{-1}$, 相对误差 $\pm 20\%$ ($0.4\ \text{min}^{-1}$, 相对误差 $\pm 20\%$)；

5 ——引伸计控制(方法 A1 闭环)或横梁控制(方法 A2 开环)；

6 ——横梁控制(方法 A2 开环)；

7 ——试验的弹性范围；

8 ——测定 R_{el} 、 R_p 、 R_t 、 A_e 的塑性范围；

9 ——测定 R_m 、 A_g 、 A_{gt} 、 A 、 A_t 和 Z 的最大应变速率。

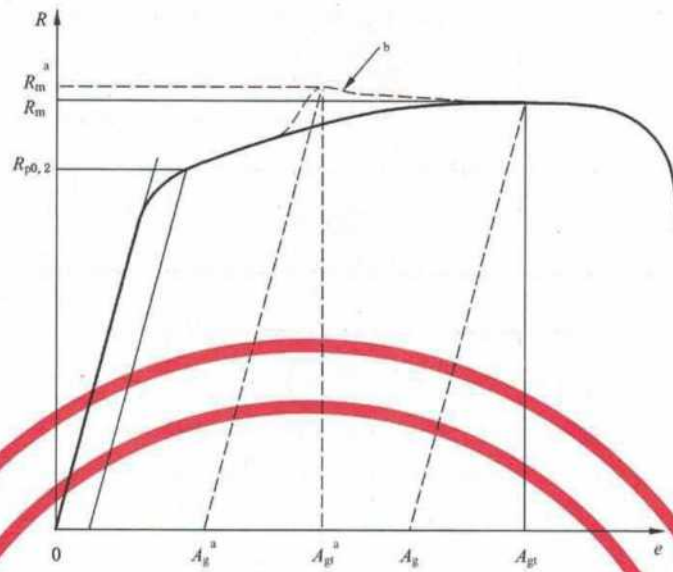
注 1: 符号参照表 1。

注 2: 方法 B 弹性范围的应变速率根据应力速率和使用 210 GPa 弹性模量计算的。

^a 推荐的。

^b 如果试验机不能测量或控制应变速率,可扩展至较低速率的范围(见 10.3.3.2.5)。

图 9 拉伸试验中测定 R_{el} 、 R_{cl} 、 R_p 、 R_t 、 R_r 、 R_m 、 A_e 、 A_g 、 A_{gt} 、 A 、 A_t 和 Z 时应选用的应变速率范围



标引符号说明：

e —— 延伸率；

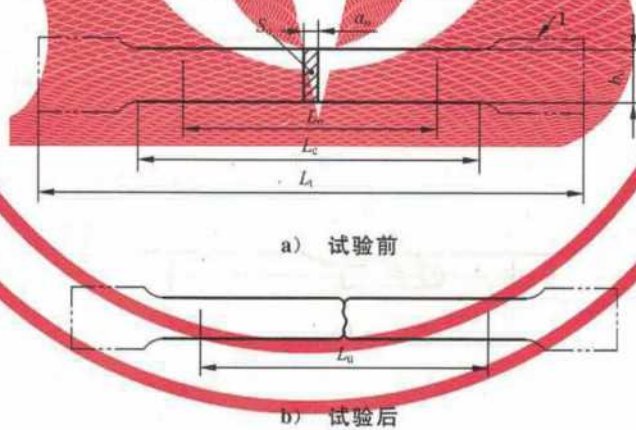
R —— 应力。

注：参数定义见表 1。

^a 非真实值，产生了突然的应变速率增加。

^b 如果应变速率突然增加时的应力-应变行为。

图 10 在应力-应变曲线上不应存在的不连续性示例



标引符号与序号说明：

a_0 —— 矩形横截面试样原始厚度或原始管壁厚度；

b_0 —— 矩形横截面试样平行长度的原始宽度；

L_0 —— 原始标距；

L_c —— 平行长度；

L_1 —— 试样总长度；

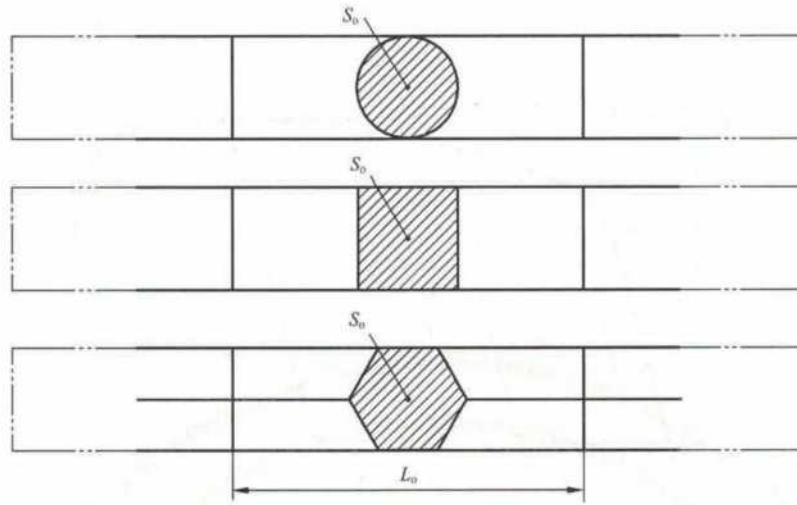
L_u —— 断后标距；

S_0 —— 平行长度的原始横截面积；

1 —— 夹持头部。

注：试样头部形状仅为示意性。

图 11 机加工的矩形横截面试样(见附录 E 和附录 G)

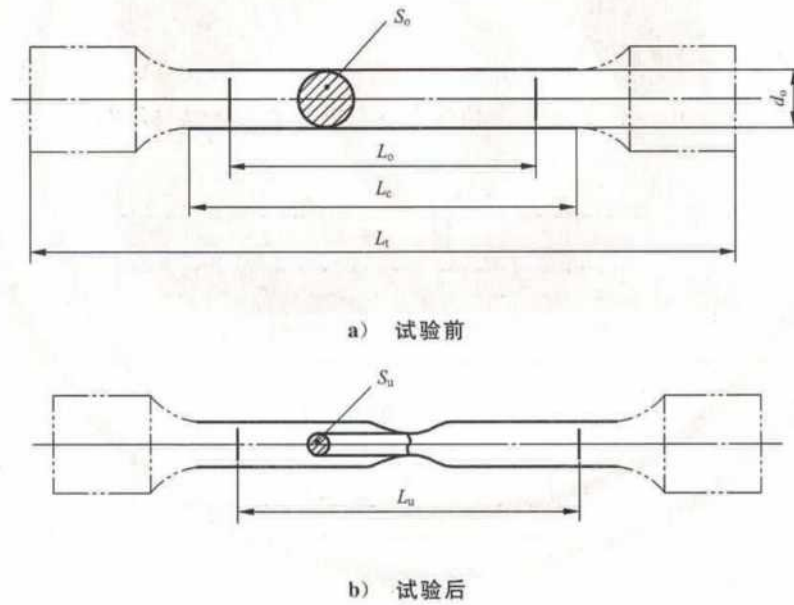


标引符号说明：

L_0 ——原始标距；

S_0 ——平行长度的原始横截面积。

图 12 为产品一部分的不经机加工试样(见附录 F)



标引符号说明：

d_0 ——圆试样平行长度的原始直径；

L_0 ——原始标距；

L_c ——平行长度；

L_t ——试样总长度；

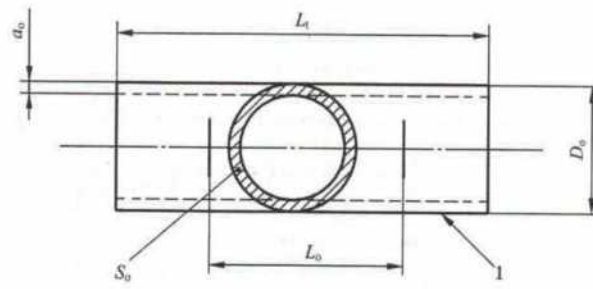
L_u ——断后标距；

S_0 ——平行长度的原始横截面积；

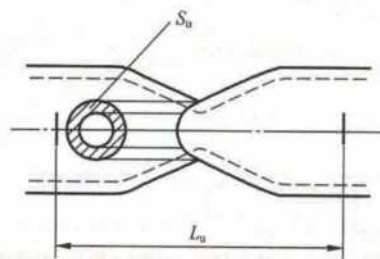
S_u ——断后最小横截面积；

注：试样头部形状仅为示意图例。

图 13 圆形横截面机加工试样(见附录 G)



a) 试验前



b) 试验后

标引符号与序号说明：

a_0 —— 原始管壁厚度；

D_0 —— 管原始外径；

L_0 —— 原始标距；

L_1 —— 试样总长度；

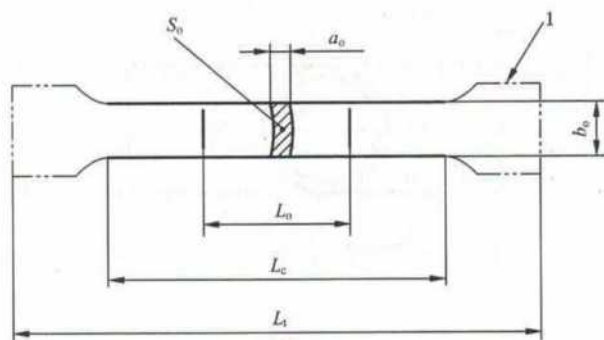
L_u —— 断后标距；

S_0 —— 平行长度的原始横截面积；

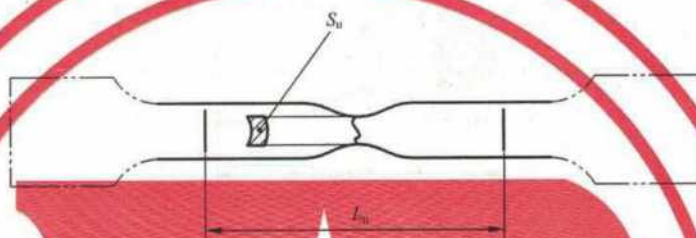
S_u —— 断后最小横截面积；

1 —— 夹持头部。

图 14 圆管管段试样(见附录 H)



a) 试验前



b) 试验后

标引符号与序号说明：

a_0 ——原始管壁厚度；

b_0 ——圆管纵向弧形试样原始宽度；

L_0 ——原始标距；

L_c ——平行长度；

L_t ——试样总长度；

L_u ——断后标距；

S_0 ——平行长度的原始横截面积；

S_u ——断后最小横截面积；

1 ——夹持头部。

注：试样头部形状仅为示意图例。

图 15 圆管的纵向弧形试样(见附录 H)

附录 A

(资料性)

本文件与 ISO 6892-1:2019 结构变化对照一览表

表 A.1 给出了本文件与 ISO 6892-1:2019 结构变化对照一览表。

表 A.1 本文件与 ISO 6892-1:2019 结构变化对照情况

本文件章条编号	ISO 6892-1:2019 章条编号
22	22 g)
23	22 a)~22 f)
24	23
附录 A	—
附录 B	—
附录 C	附录 A
附录 D	附录 G
附录 E	附录 B
附录 F	附录 C
附录 G	附录 D
附录 H	附录 E
附录 I	附录 F
附录 J	—
附录 K	—
附录 L	附录 J
附录 M	附录 H
附录 N	附录 I
附录 O	附录 K
附录 P	附录 L

附录 B

(资料性)

本文件与 ISO 6892-1:2019 技术差异及其原因一览表

表 B.1 给出了本文件与 ISO 6892-1:2019 技术差异及其原因一览表。

表 B.1 本文件与 ISO 6892-1:2019 技术差异及其原因

本文件的章节编号	技术差异	原因
2	增加规范性引用文件 GB/T 2975、GB/T 8170、GB/T 10623、GB/T 22066、JJG 139、JJG 475、JJG 762、JJG 1063,用我国标准 GB/T 12160、GB/T 16825.1代替 ISO 9513、ISO 7500-1	更严谨,以符合国情,方便使用
3	增加引用了 GB/T 10623 界定的术语,将“斜率的标准偏差、斜率的相对标准偏差”两个术语改为表 1 相应符号的脚注	以符合国情,方便使用
6.3	增加引用了 GB/T 2975,给出钢产品的取样和制样要求	以符合国情,方便使用
8.2	增加引用了 GB/T 8170 进行数值修约	以符合国情,方便使用
9	增加了试验机的测力系统应按照 JJG 139或 JJG 475 或 JJG 1063 进行校准,增加了引伸计的准确度级别应符合 GB/T 12160 的要求并按照 JJG 762 进行校准,增加了计算机控制拉伸试验机应满足 GB/T 22066 的要求	以符合国情,方便使用
10.3.1	将试样修改为 P6	以符合国情,方便使用
12 a)、b)、c)、d)	增加对于上、下屈服强度位置判定的基本原则	以符合国情,方便使用
13.3	增加了“可采用附录 J 提供的逐步逼近方法测定规定塑性延伸强度”	引用附录 J,方便使用
17	增加了“有些材料其最大力塑性延伸率不等于无缩颈塑性延伸率,对于棒材、线材和条材等长产品,可采用附录 L 的方法测定无缩颈塑性延伸率 A_{un} ”	以符合国情,方便使用
22	增加一章试验结果数值的修约,并增加引用 GB/T 8170	条理清晰,方便使用

表 B.1 本文件与 ISO 6892-1:2019 技术差异及其原因 (续)

本文件的章条编号	技术差异	原因
附录 D	对国际标准附录 G 利用单轴拉伸试验测定金属材料的弹性模量中的相应错误进行了修改,增加引用了 JJG 139 对试验机力测量系统的准确度等级的要求,增加引用了 JJG 762 对引伸计系统在相应测量范围的准确度要求	避免错误使用,相关论文已发表,见参考文献[24],以符合国情,方便使用
附录 E 的表 E.1、表 E.2 和表 E.3	增加表 E.1 矩形横截面比例试样; 表 E.2 中增加试样过渡弧半径和试样编号内容,对 25 mm 宽度试样增加推荐带头平行长度和不带头平行长度; 表 E.3 增加试样名义宽度 10 mm 和 15 mm 的尺寸公差和形状公差要求	方便使用
附录 F 的表 F.1	增加表 F.1 非比例试样	方便使用
附录 G 的表 G.1、表 G.2 和表 G.3	表 G.1 中增加直径 3、6、8、15 和 20 的试样相关信息; 增加表 G.2 矩形横截面比例试样; 表 G.3 矩形截面非比例试样中增加了宽度 12.5 和 38 的试样信息	方便使用
附录 H 的表 H.1、表 H.2 和表 H.3	增加表 H.1、表 H.2 和表 H.3	方便使用

附录 C

(资料性)

计算机控制拉伸试验机使用的建议

C.1 总则

本附录包含了利用计算机控制的拉伸试验机测定力学性能的附加建议。尤其是提出了考虑软件和试验条件的建议。

这些建议与设计试验机的软件、软件的有效性和拉伸试验的条件相关。

C.2 拉伸试验机

C.2.1 设计

试验机在设计时应考虑能够通过软件提供不加处理的模拟信号的输出。如果不能提供这种输出,机器的制造商应该给出原始数据是如何通过软件获取和处理的。应该以基本的 SI 单位给出力、延伸、横梁分离时间和试样尺寸。如果机器升级,应修正这些数据。图 C.1 给出了适合的数据文献格式的例子。

C.2.2 数据采样频率

对于每一个测量通道的机械和电子元件的频带宽度和采样频率应足够高,以便记录被测材料特性。例如为了测 R_{eH} , 根据公式(C.1)测定最小采样频率(f_{min}):

$$f_{min} = \frac{\dot{\epsilon} \times E}{R_{eH} \times q} \times 100 \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

f_{min} ——最小采样频率;

$\dot{\epsilon}$ ——应变速率,单位为每秒(s^{-1});

q ——试验机测力系统的准确度级别。

公式(C.1)中选用 R_{eH} ,是由于在试验过程中的瞬时效应决定的。如果被测材料没有屈服现象,将选用规定塑性延伸强度($R_{p0.2}$)而且要求的最小采样频率可以减半。

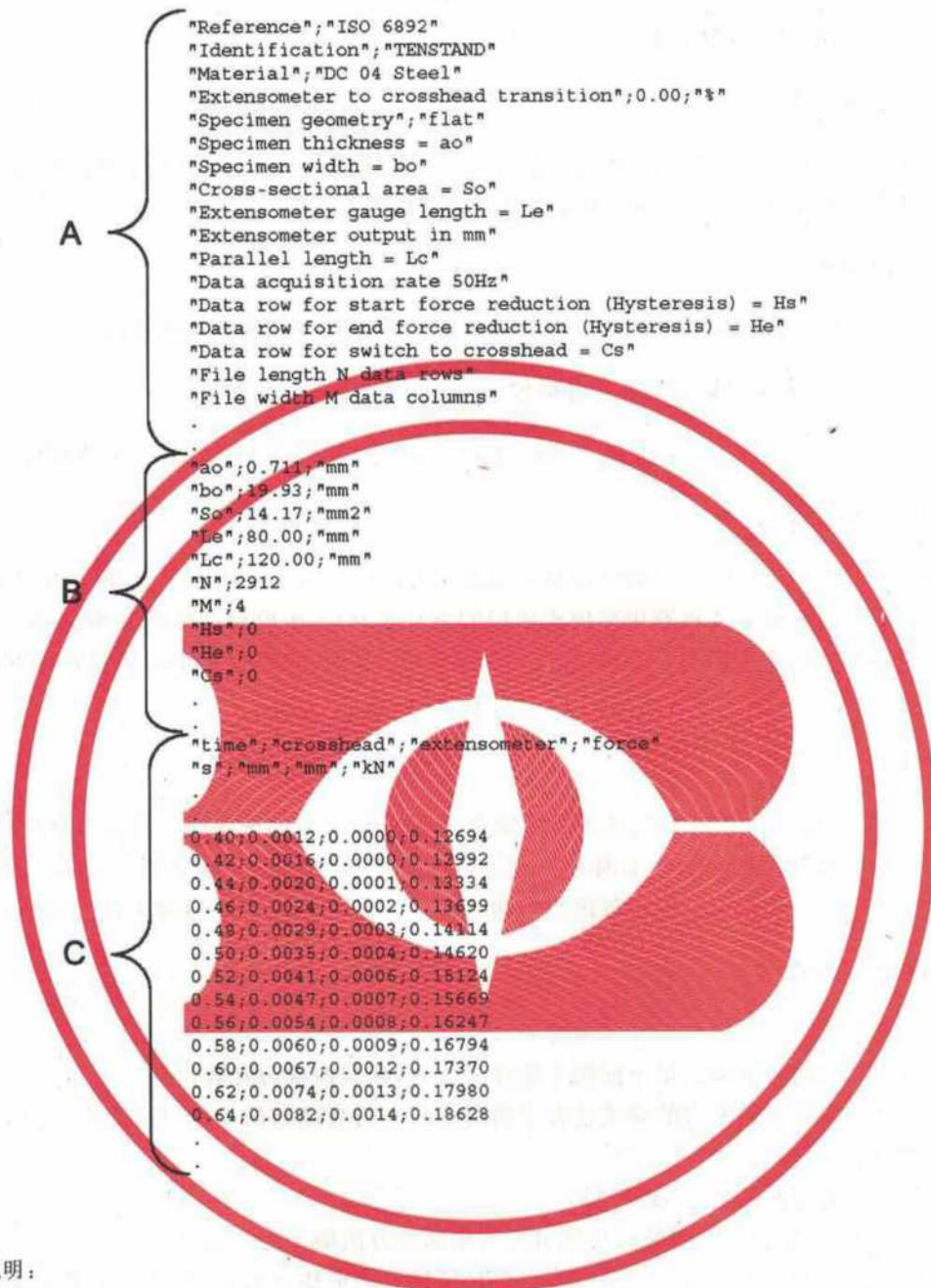
如果用应力速率控制的方法 B,利用公式(C.2)计算最小采样频率(f_{min}):

$$f_{min} = \frac{R}{R_{eH} \times q} \times 100 \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

f_{min} ——最小采样频率;

q ——试验机测力系统的准确度级别。



标引序号说明：
A —— 程序开始；
B —— 试验参数和试样尺寸；
C —— 数据。

图 C.1 适合的数据文件格式范例

C.3 力学性能的测定

C.3.1 通则

试验机的软件应考虑 C.3.2~C.3.6 的要求。

C.3.2 上屈服强度和下屈服强度

C.3.2.1 上屈服强度

在 3.10.2.1 中定义的 R_{eH} 应该被认为是力值在下降至少 0.5% 之前最高力对应的应力值, 并且在其随后应变范围不小于 0.05% 的区域, 力没有超过先前的最大值。

C.3.2.2 下屈服强度

在 3.10.2.2 中定义的 R_{eL} 应满足第 12 章中下屈服强度位置判定的基本原则。

C.3.3 规定塑性延伸强度和规定总延伸强度

3.10.3 和 3.10.4 定义的 R_p 和 R_t 这两种性能可以通过曲线上相邻点的内插来确定。

C.3.4 最大力总延伸率

在 3.6.4 定义的 A_{gt} (见图 1) 被认为是屈服阶段之后的应力-延伸率曲线上最大力对应的总延伸。

对于某些材料是有必要推荐用多项式回归的方法进行应力-应变曲线的光滑处理。光滑处理的程度对试验结果可能会产生影响。光滑处理后的曲线应该合理地表征原始应力-延伸率曲线的相关部分的特征。

C.3.5 最大力塑性延伸率

在 3.6.5 定义的 A_g (见图 1) 被认为是屈服点之后的应力-延伸率曲线上最大力对应的塑性延伸。

对于某些材料有必要对应力-延伸率曲线进行光滑处理, 推荐用多项式回归方法。光滑处理的程度可能会对试验结果产生影响。光滑处理后的曲线应合理表征原始应力-延伸率曲线的相关部分。

C.3.6 断裂总延伸率

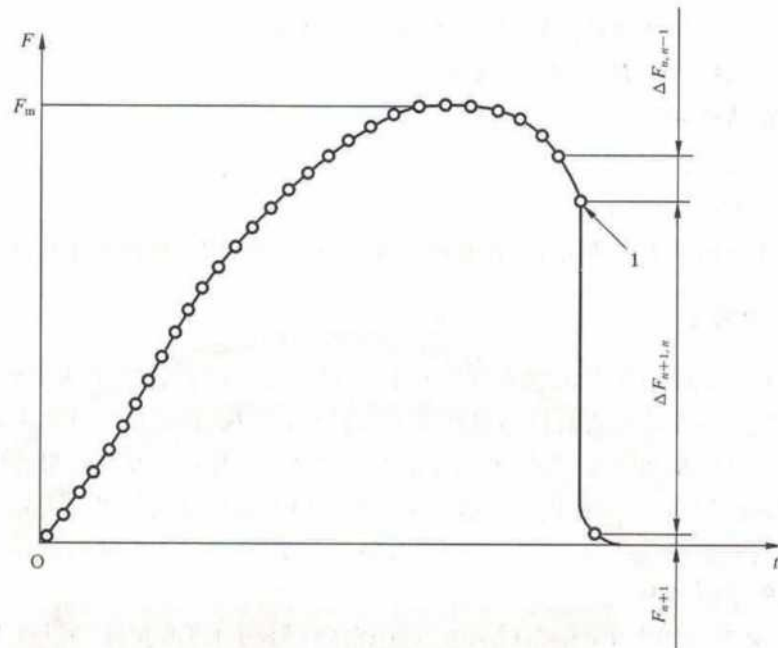
C.3.6.1 应参照图 C.2 中断裂的定义测定 A_{10} 。

当两个相邻力值点衰减满足下面两个条件之一时, 断裂被认为有效:

- a) 如果两相邻点间的力的衰减量大于前两点间力的衰减量的 5 倍, 而随后一点的力值小于最大力的 2%;
- b) 低于最大力值的 2% (软材料)。

增加采样率和/或力信号的滤波可能会影响根据该方法确定的断裂点。

另外还有一种测定试样断裂点的方法是监测试样上的电压或电流, 把试样上的电流中断前的测量值看作断裂值。



标引序号与符号说明：

F ——力；

F_m ——最大力；

F_{n+1} —— $n+1$ 测量点的力值；

$\Delta F_{n,n-1}$ —— n 和 $n-1$ 测量点之间力值差；

$\Delta F_{n+1,n}$ —— $n+1$ 和 n 测量点之间力值差；

t ——时间；

1 ——断裂；

○ 数据点。

断裂判定标准： $|\Delta F_{n+1,n}| > 5|\Delta F_{n,n-1}|$ 和/或 $F_{n+1} < 0.02F_m$

图 C.2 试样断裂点的定义原理图

C.3.6.2 如果引伸计一直保持到试样断裂,按图 C.2 记录 1 点的值。

C.3.6.3 如果在最大力(F_m)之后断裂之前摘除了引伸计,那么就允许用横梁位移测定摘除引伸计之后和断裂之间的附加的延伸。该方法应该被证实可行后方可使用。

C.3.7 弹性范围曲线斜率的测定

为了保证试样未知特性的有效性,使用的方法不应依赖于任何预先定义的应力极限,除非在产品标准中或用户试验双方的协议中有规定。

最简单的方法就是基于可变化部分的特性进行计算。参数如下：

- a) 可变化部分的长度(使用的点数)；
- b) 选择按照定义确定曲线斜率的方程。

注：如果力-延伸曲线图的直线部分不能清晰地确定,见 13.1 和附录 L。

曲线弹性范围的斜率相应于满足下列条件范围的平均斜率：

- 可变化部分的斜率恒定；
- 被选择的范围有代表性。

总之,应当建议用户选取合适的极限范围,避免曲线弹性范围斜率数值不具有代表性值。

其他可接受的方法见参考文献[10]、参考文献[25]~参考文献[27]。

一种测定弹性线斜率评估 $R_{p0.2}$ 的方法如下:

- 线性范围的线性回归;
- 下极限: $\approx 10\%$ 的 $R_{p0.2}$;
- 上极限: $\approx 50\%$ 的 $R_{p0.2}$;
- 为了获得更准确的 $R_{p0.2}$ 数据,应检查弹性线,如果必要,用其他极限重新计算。

C.4 试验机软件的有效性

测定不同材料特性试验系统所用方法的有效性,应通过与传统方式模拟图或数字数据测定的结果相比较进行检查确定。直接从试验机传感器或放大器获取的数据,应使用具有一定频带宽度、取样频率和不确定度的设备进行采集和处理,且至少应与提供给试验机计算机计算的结果相等。

如果在同一组相同的试样上,计算机测定值与手工测定值的算术平均值之间差异很小,就可以认为计算机的处理具有一定的准确度。为了评估差异的可接受程度,应测试 5 支相似试样,每一相关性能的差异应在表 C.1 所示的范围之内。

注:这一方法仅仅证实,试验机对于特定试样形状、试验材料和所使用的条件找到了材料的性能,但没有给出被试材料的性能是正确或适用的置信度。

表 C.1 计算机导出和手工处理的结果的最大允许差

参数	D^a		s^b	
	相对误差	绝对误差	相对误差	绝对误差
$R_{p0.2}$	$\leq 0.5\%$	2 MPa	$\leq 0.35\%$	2 MPa
R_{p1}	$\leq 0.5\%$	2 MPa	$\leq 0.35\%$	2 MPa
R_{eH}	$\leq 1\%$	4 MPa	$\leq 0.35\%$	2 MPa
R_{eL}	$\leq 0.5\%$	2 MPa	$\leq 0.35\%$	2 MPa
R_m	$\leq 0.5\%$	2 MPa	$\leq 0.35\%$	2 MPa
A	—	$\leq 2\%$		$\leq 2\%$

$$^a D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i$$

$$^b s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - D)^2}$$

式中:

D_i —— 试样手工评估结果(H_i)与计算机评估结果(R_i)之差($D_i = H_i - R_i$);

n —— 同一样品上的相同试样数(≥ 5)。

^c 应当考虑相对值和绝对值的最高值。

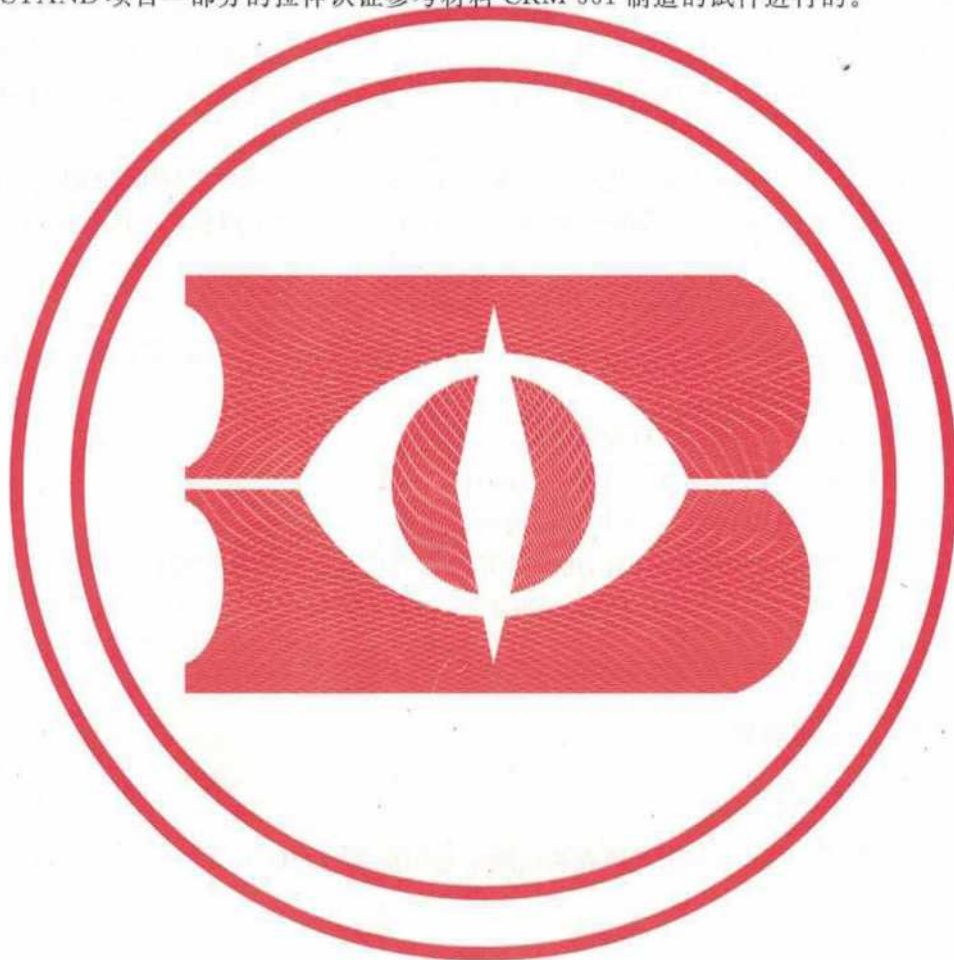
如使用其他方法,例如一组已知材料质量水平的预定数据正确处理的方法,这些都应符合表 C.1 的要求。

作为欧盟资助的 TENSTAND 项目(GBRD-CT-2000-00412)的部分,拉伸性能一致的 ASCII 数据文件宜用于软件有效性的评价。详细信息见参考文献[29]和参考文献[30]。

C.5 计算机兼容标准的代表

在 CEN/WS ELSSI-EMD 范围内开发的标准计算机可读数据格式的计算机兼容表示,为克服系统互操作性问题和实现工程材料部门的电子报告提供了有效手段。CWA 16200 报告了 CEN/WS ELSSI-EMD 的研究结果,该研究旨在建立基于力学试验文件标准定义数据格式的可行性。CWA 16200描述的基于文件测试标准定义计算机可读数据格式的指南已应用于 ISO 6892-1。结果定义可从 BSI 标准资源服务器获得。

为了证明其潜在用途,CWA 16200 包括基于拉伸试验的数据格式的报告能力示例,该拉伸试验是使用作为 TENSTAND 项目一部分的拉伸认证参考材料 CRM 661 制造的试件进行的。



附录 D

(规范性)

通过单轴拉伸试验测定金属材料的弹性模量

D.1 引言

尽管本文件要求生成一条具有给定偏置量且平行于应力-应变曲线线性区域的直线,以确定规定的塑性延伸强度(R_p),对于被测材料,大多数用户通常假定应力-应变曲线的线弹性区的斜率与被测材料的弹性模量相对应,因为弹性模量(E)由关系 $E = \text{应力} / \text{应变}$ 给出。但是,一般来说,拉伸试验所需的 1 级引伸计,不足以精确测量弹性区域内非常小的应变,非常小的应变区域内要求测量精度足以给出具有可接受不确定度水平的模量值。

不要求使用本附录来测定用于规定塑性延伸强度的应力-延伸曲线弹性部分的斜率。

通过拉伸试验测定弹性模量的附加描述见 ASTM E111。有关信息,见 SEP 1235。

D.2 通则

本附录包含使用单轴拉伸试验确定弹性模量的附加要求。本试验方法仅限于符合下列条件的材料。

——忽略评估范围内材料的蠕变效应;

——评估范围内材料弹性范围内有足够的直线区域。

这些要求与试验设备的设计、试样和试验评估相关。

弹性模量是材料的一种性能特性,用于计算符合胡克定律的产品和部件的弹性。

注:由于受引伸计位移精度等级的限制,该试验通常以区别于拉伸试验的单独试验进行。

D.3 试验设备

D.3.1 试验设备的准确度

D.3.1.1 力值测量装置

试验机力测量系统的准确度等级在相应测量范围应满足 GB/T 16825.1 或 JJG 139 中的 1 级准确度等级的要求。

D.3.1.2 引伸计系统

引伸计系统在相应测量范围应满足 GB/T 12160 或 JJG 762 中 0.5 级准确度的要求。应在试样的两侧测量应变。推荐使用大于或等于 50 mm 标距的引伸计。

注:如果只在试样单侧测量应变,由于附加弯曲应变会对测量结果带来较大误差。

D.3.1.3 测试系统的分辨率

测试系统的分辨率应足以在评估范围内获得至少 50 个不同的离散测量值。

D.3.1.4 测定相关试样尺寸的测量装置

用于测定原始横截面积的所有测量装置应按照相关标准进行校准,并可追溯至国家测量系统。测量装置应能保证测量数据的准确度优于测量值的 $\pm 0.5\%$ 。

D.3.2 夹持方法和同轴度

夹持和对准方法对于测定弹性模量非常重要。有关夹持方法的要求,见 10.2,更多信息见 ASTM E1012。其他有用信息可见 GB/T 34104。推荐使用力学装置(例如试样定位块)来保证试样有好的加载同轴度。

D.4 试样

D.4.1 通则

试样应平直。

注:弯曲或扭曲的试样不能根据本附录进行试验。

试样的表面状态不应影响试验结果。如果样品中存在残余应力,无论是先前加工还是样品制备带来的,所测定的模量值可能不代表基材。

D.4.2 原始横截面积的测定

原始横截面积的测定见第 7 章。除第 7 章中的要求外,每个尺寸至少应进行三次测量。原始横截面积 S_0 是平均横截面积,应根据适当尺寸的测量值进行计算。原始横截面积的测量准确度应不低于 $\pm 0.5\%$ 。

D.5 步骤

D.5.1 通则

如果直至 R_{eH} 或 $R_{p0.2}$ 的应力-应变曲线是未知的,在测量弹性模量之前应进行预试验。

D.5.2 设定力值零点

力值零点的设定应按照 10.1 进行。

D.5.3 试验条件

D.5.3.1 试验速率

相比拉伸试验测定的其他性能指标,弹性模量对于试验速率较不敏感。试验速率应满足方法 A 范围 1 的要求。其他试验速率包括方法 B 的速率也是允许的。试验速率宜较低,以达到分析所需的数据点数量。宜采用恒定的横梁位移速率以避免出现任何不连续。

D.5.3.2 数据采集频率

数据采集频率的选择应确保在相关范围(R_1, R_2)内至少获得 50 个测量值。

最低的采样频率可以通过公式(D.1)计算得到:

$$f = \frac{N \cdot E \cdot \dot{\epsilon}}{R_2 - R_1} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

f ——最低采样频率;

$\dot{\epsilon}$ ——应变速率,单位为每秒(s^{-1});

N ——相关范围测量值的数量。

对于 $R_1=10$ MPa、 $R_2=50$ MPa 的钢,试验速率为 $0.000\ 07\ s^{-1}$ 时,采样频率应大于 18 Hz。

D.5.3.3 试验过程

如果试样用于多次测定弹性模量,则施加的力不应大于对应于预期 R_{eH} 或 $R_{p0.2}$ 的 50% 的值。否则,试验可进行到发生塑性变形的位罝。

D.6 评估

D.6.1 引伸计信号的平均化

D.6.2 中计算所需的平均应变,是通过平均每个应力值下的试样两侧的应变得到的。试样相对两侧的应变数据和两条曲线斜率的差异可以通过优化测试设备(减少弯曲)来减小。有关更多信息,见 ASTM E1012。其他有用信息可见 GB/T 34104。

D.6.2 弹性模量的计算

为了评估记录的数据,建议采用交互式方法。该方法以数值确定弹性范围的最佳拟合线(最小二乘法)为基础,包括对最佳拟合线与实际测量读数曲线之间的匹配进行视觉评估,然后在适当的情况下通过更改的参数进行重新计算。因此,它本质上是对 X-Y 图的人工分析。这种方法的使用取决于合适的计算机软件。

应在较低应力值(R_1)和较高应力值(R_2)之间进行应力-应变(D.4)的线性回归(或者,可使用应变值 e_1 和 e_2)见公式(D.2):

$$R = \frac{E \cdot e}{100\%} + b \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

- e ——百分比延伸,以%表示;
- b ——应力的偏置量,单位为兆帕(MPa)。

以这种方式确定的直线应绘制在应力应变图中,为此放大该图的初始部分。应目视评估直线和曲线之间的匹配性。考虑测定系数(R^2)可能有用,该系数宜接近 1 (>0.9995),由此考虑的数据点数量至少为 50 个。

另一个有用的工具是计算相对标准差。相对标准差考虑了测定系数(R^2)和其他统计数据中考虑的数据点数量。相对标准差应小于 1%。

通过移动下限或上限值并相应地重新计算公式,可以使最佳拟合线(即弹性模量)适合曲线。

建议将以下值作为回归计算的起点:

- 较低应力值 R_1 : $\approx R_{eH}$ 或 $R_{p0.2}$ 的 10%;
- 较高应力值 R_2 : $\approx R_{eH}$ 或 $R_{p0.2}$ 的 40%。

此外,应变偏置量可根据公式(D.3)计算:

$$x_{(y=0)} = \frac{-b}{E} \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

- b ——应力的偏置量,单位为兆帕(MPa)。

在最佳测试条件下,选择的默认值对计算结果影响不大。示例:如果材料满足 D.2 中描述的一般条件,并且确定的默认值 R_1 和 R_2 分别为 R_{eH} 或 $R_{p0.2}$ 的 10% 和 40%,则在确定的间隔内使用默认值重新计算公式(例如 10% 到 20%,20% 到 30%,30% 至 40% 的 R_{eH} 或 $R_{p0.2}$)不会对结果产生显著影响。

如果材料没有显示出弹性直线,例如铸铁,或回归数据的数量不够,即 $R^2 < 0.9995$,则不应确定弹性模量。

建议在日常的测试中使用合适的参考试样,定期检查结果的重复性。合适的参考试样可以在内部

制造,并且应具有与试样相同的几何形状。进一步的数学方法和计算机分析方法可用于评价弹性模量。

D.7 测量不确定度

D.7.1 概述

用拉伸试验测定的金属材料弹性模量,其测量不确定度是根据 JJF 1059.1 并参考附录 O 导则进行评定的。对于弹性模量的合成标准不确定度,其 A 类不确定度的信息来源于最小二乘法线性回归统计分析,其 B 类不确定度的信息来源于所用测量设备和仪器的准确度级别或检定证书,以及试验方法标准规定的相关测量误差要求等。

D.7.2 弹性模量的测量不确定度评定

D.7.2.1 弹性模量测量不确定度的表示

D.7.2.1.1 弹性模量的相对合成标准不确定度

弹性模量 E 的相对合成标准不确定度按公式(D.4)表示为:

$$u_{c,rel}(E) = \sqrt{u_{c,A,rel}^2(E) + u_{rel}^2(F) + u_{rel}^2(\Delta) + u_{rel}^2(L_e) + u_{rel}^2(S_0)} \quad \text{.....(D.4)}$$

式中:

- $u_{c,rel}(E)$ ——弹性模量的相对合成不确定度,用%表示;
- $u_{c,A,rel}^2(E)$ ——弹性模量的合成相对标准不确定度的 A 分量,用%表示;
- $u_{rel}^2(F)$ ——由于测力系统(力传感器)误差引起的相对标准不确定度分项,用%表示;
- $u_{rel}^2(\Delta)$ ——由于测延伸系统(引伸计)误差引起的相对标准不确定度分项,用%表示;
- $u_{rel}^2(L_e)$ ——由于引伸计标距误差引起的相对标准不确定度分项,用%表示;
- $u_{rel}^2(S_0)$ ——由于试样原始横截面积测量误差引起的相对标准不确定度分项,用%表示。

D.7.2.1.2 弹性模量的合成(绝对)标准不确定度

弹性模量 E 的合成(绝对)标准不确定度按公式(D.5)表示为:

$$u_c(E) = E u_{c,rel}(E) \quad \text{.....(D.5)}$$

D.7.2.1.3 弹性模量的扩展不确定度

弹性模量的扩展不确定度按公式(D.6)表示为:

$$u_{95,rel} = k u_{c,rel}(E) = 2 u_{c,rel}(E) (k=2) \quad \text{.....(D.6)}$$

或者按公式(D.7)表示为:

$$u_{95} = k [E u_{c,rel}] = 2 E u_{c,rel}(E) (k=2) \quad \text{.....(D.7)}$$

扩展不确定度一般取不多于两位有效数字,报告时注明包含因子 $k=2$ 。

D.7.2.2 弹性模量的测量不确定度评定举例

D.7.2.2.1 弹性模量数据举例

已知数据(取自参考文献[16]):

引伸计标距: $L_e = 50 \text{ mm}$;

试样原始横截面积: $S_0 = 78.54 \text{ mm}^2$;

力-延伸曲线斜率: $m = 293.07 \text{ kN/mm}$;

力-延伸曲线斜率的标准不确定度 A 分量： $u_{c,A}(m) = 0.06 \text{ kN/mm}$ ；
弹性模量： $E = 186.7 \text{ GPa}$ 。

D.7.2.2.2 弹性模量相对合成标准不确定度的 A 分量 $u_{c,A,rel}(E)$ 评定

合成相对标准不确定度的 A 分量评定的信息来自最小二乘法回归的统计分析：

- a) 回归的弹性直线为应力-应变型(即 $R = b + Ee$ 型)情况；
- * A 分量按照公式(D.8)计算(见参考文献[61])：

$$u_{c,A,rel}(E) = \frac{s}{E \sqrt{S_{ee}}} \dots\dots\dots (D.8)$$

式中：

s ——回归标准偏差,按照公式(D.9)计算；

$$S_{ee} = \sum_1^n (e_i - \bar{e})^2。$$

$$s = \sqrt{\frac{S_{RR} - ES_{eR}}{n - 2}} \dots\dots\dots (D.9)$$

式中：

E ——弹性模量(即回归的应力-应变直线的斜率)；

$$S_{RR} = \sum_1^n (R_i - \bar{R})^2；$$

$$S_{eR} = \sum_1^n (e_i - \bar{e})(R_i - \bar{R})；$$

n = 用于回归直线统计计算的数据对(e_i, R_i)的数目。

- b) 回归的弹性直线为力-延伸型(即 $F = c + m\Delta$ 型)情况；
- A 分量按照公式(D.10)计算(见参考文献[61])：

$$u_{c,A,rel}(E) = \frac{\dot{s}}{m \sqrt{S_{\Delta\Delta}}} = \frac{u_{c,A}(m)}{m} \dots\dots\dots (D.10)$$

式中：

\dot{s} ——回归标准偏差,按照公式(D.11)计算；

$$S_{\Delta\Delta} = \sum_1^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2。$$

$$\dot{s} = \sqrt{\frac{S_{FF} - mS_{\Delta F}}{n - 2}} \dots\dots\dots (D.11)$$

式中：

m ——回归的力-延伸直线的斜率；

$u_{c,A}(m)$ ——回归的力-延伸直线斜率(m)的不确定度；

$$S_{FF} = \sum_1^n (F_i - \bar{F})^2；$$

$$S_{\Delta F} = \sum_1^n (\Delta_i - \bar{\Delta})(F_i - \bar{F})；$$

n ——用于回归直线统计计算的数据对(Δ_i, F_i)的数目。

将前述已知数据 m 和 $u_{c,A}(m)$ 的值代入式(D.10)计算即得到弹性模量合成相对标准不确定度的 A 分量：

$$u_{c,A,rel}(E) = \frac{0.06 \text{ kN/mm}}{293.07 \text{ kN/mm}} = 0.02\%$$

D.7.2.2.3 弹性模量相对合成标准不确定度的 B 分量各分项评定

合成相对标准不确定度的 B 分量评定的信息来源于所使用的测量系统或测量设备仪器的准确度

等级所带有的误差或试验方法规定的极限误差等,采用除统计方法以外的其他分析法评定。对式(D.4)右边根号内的4项B类评定的不确定度分别评定如下。

- a) 测力误差引起的相对标准不确定度分项 $u_{\text{rel}}(F)$:本附录规定拉伸试验机的测力系统应符合 GB/T 16825.1 的1级准确度要求。该级允许误差为 $\pm 1.0\%$ 。这一误差是不确定度源之一,为了将此误差量化转换成标准偏差(即标准不确定度),需要知道量 F 取值的分布和包含因子 (k),如果不知道,一般把它近似为均匀分布(矩形分布),包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。由这误差引起的标准不确定度量化为:量 F 分散区间半宽度 (a) 除以包含因子 (k):

$$u_{\text{rel}}(F) = \frac{a}{k} = \frac{1}{\sqrt{3}}\%$$

- b) 测延伸误差引起的相对标准不确定度分项 $u_{\text{rel}}(\Delta)$:本附录规定引伸计系统宜符合 GB/T 12160 的0.5级准确度要求,该级允许误差为 $\pm 0.5\%$ 或 $\pm 1.5\ \mu\text{m}$ 。因为在测定金属材料弹性模量试验中,测量的延伸量很小,宜采用绝对误差值 $\pm 1.5\ \mu\text{m}$ 。

因为准确度级给定,也就给定了允许的绝对误差值 δ ,而关键是延伸测量范围 Δ 如何确定,这要考虑弹性模量,引伸计标距,评定弹性模量的应力上限等因素。为了能够按照附录J进行评定,建议延伸相对误差按式(D.12)计算:

$$\epsilon = \left(\frac{\delta}{\Delta} \right) = \left(\frac{\delta}{0.4R_{\text{eH}} \times L_e} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(\text{D.12})$$

式中:

ϵ —— 相对误差, %;

δ —— 引伸计准确度0.5级允许的绝对误差,单位为微米(μm);

Δ —— 延伸测量范围,单位为微米(μm)。

式(D.12)中“ $0.4R_{\text{eH}}$ (或 $0.4R_{\text{p0.2}}$)”应力上限取自本附录给定的经验值。

例如,引伸计符合 GB/T 12160 的0.5级准确度要求, $\delta = \pm 1.5\ \mu\text{m}$,标距 $L_e = 50\ \text{mm}$;上屈服强度 $R_{\text{eH}} = 500\ \text{MPa}$;测定的弹性模量 $E = 186.7\ \text{GPa}$ 。计算的相对误差 $\epsilon = \pm 2.8\%$ 。这一误差引起的相对标准不确定度分项为:

$$u_{\text{rel}}(\Delta) = \frac{a}{k} = \frac{2.8}{\sqrt{3}}\%$$

- c) 引伸计标距误差引起的相对标准不确定度分项 $u_{\text{rel}}(L_e)$:本附录规定引伸计系统宜符合 GB/T 12160 的0.5级准确度要求,该级允许引伸计标距误差为 $\pm 0.5\%$ 。由这一误差引起的相对标准不确定度分项为:

$$u_{\text{rel}}(L_e) = \frac{a}{k} = \frac{0.5}{\sqrt{3}}\%$$

- d) 试样原始横截面积误差引起的相对标准不确定度分项 $u_{\text{rel}}(S_0)$:试样原始横截面积(S_0)不是直接测量得到,对于圆形横截面试样,试验前测量其横截面直径(d_0),然后按照公式(D.13)计算得到:

$$S_0 = \frac{1}{4}\pi d_0^2 \dots\dots\dots(\text{D.13})$$

根据上式,原始横截面积测量不确定度应按公式(D.14)定义为:

$$u_{\text{rel}}(S_0) = 2u_{\text{rel}}(d_0) \dots\dots\dots(\text{D.14})$$

根据 D.3.1.4 规定,测量试样尺寸的装置其测量准确度应优于 $\pm 0.5\%$,该误差引起尺寸测量的

相对不确定度为 $u_{\text{rel}}(d_0) = \frac{a}{k} = \frac{0.5}{\sqrt{3}}\%$,将其代入公式(D.14)得到:

$$u_{\text{rel}}(S_0) = \frac{1}{\sqrt{3}}\%$$

D.7.2.2.4 弹性模量相对合成标准不确定度 $u_{\text{c,rel}}(E)$ 计算

将 D.7.2.2.2 的 A 分量计算值和 D.7.2.2.3 的 4 分项的计算值代入公式 (D.4) 得到弹性模量合成相对标准不确定度:

$$u_{\text{c,rel}}(E) = \sqrt{(0.02)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2.8}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 1.8\%$$

D.7.2.2.5 弹性模量扩展不确定度计算

扩展不确定度(相对)按照式 (D.6) 计算:

$$U_{95,\text{rel}} = 2 \times 1.8\% = 3.6\% (k=2)$$

扩展不确定度(绝对)按照式 (D.7) 计算:

$$U_{95} = 2 \times (186.7 \times 1.8\%) = 6.7 \text{ GPa} (k=2)$$

弹性模量试验结果: $[186.7 \pm 6.7] \text{ GPa}$ ($k=2$, 95% 置信水平)。

D.8 试验报告

试验报告应包含第 23 章 a)~f) 项要求的信息。此外,还应包括以下信息:

- 引伸计系统的类型;
- 默认应力值 R_1 和 R_2 (单位为 MPa) 或默认应变值 e_1 和 e_2 (单位为 %);
- 评估范围 (R_1 和 R_2 之间或 e_1 和 e_2) 内的测量值数量;
- 弹性模量按照 GB/T 8170 修约到 0.1 GPa;
- 包括置信度水平和测定方法的测量不确定度 (C.5 或表 D.2);
- 直线最佳拟合的测定系数 (R^2) 或斜率的标准偏差 (S_m) (单位为 GPa) 或斜率的相对标准偏差 ($S_{m,\text{rel}}$, %)。

D.9 附加考虑

通常,除非采用特殊的高分辨率平均引伸计系统,否则在拉伸试验中很难确定可靠的弹性模量值,而且这种装置通常不适合覆盖拉伸试验的全部范围。如果使用单侧引伸计或卡规,则试件的任何轻微不同轴都可能增加表观模量测量的误差。

D.10 测定模量的其他方法

拉伸试验不是确定弹性模量可靠值的最佳方法,其他替代方法(如脉冲振动法或超声波)是可取的。更多信息见参考文献[25]、参考文献[51]~参考文献[53]。

D.11 不确定度和再现性

此处不包括全部不确定度评估,但基于与模量测量相关的指南标准(见参考文献[9])估算不确定度的程序已作为欧洲 UNCERT 项目的一部分开发,用于拉伸试验(见参考文献[54])和动态测量(见参考文献[55])。

表 D.1 总结了基于一系列拉伸试验相互比较练习的标准偏差(s)的 2 倍的模量测量的再现性,这些测试作为 TENSTAND 项目的一部分进行了整理。

表 D.1 Round-Robin 试验概述:弹性模量或弹性线斜率

参考文献	作者	年代	材料	再现性($\pm 2s$) %
建筑材料试验	Unwin(见参考文献[57])	1910	软钢	2
VAMAS	Lord, Roebuck and Orkney(见参考文献[58])	1995	SiC/Al MMC	6
BCR 拉伸参考材料 CRM 661	Ingelbrecht and Loveday(见参考文献 [37])	2000	Nimonic 75	12
TESTAND WP3 模量测定	Lord, Rides and Loveday(见参考文献 [56])	2005	多种	5-25
TESTANDWP2 ASCII 数据文件	Lord, Loveday, Rides and McEntegart(见参考文献 [30])	2005	多种—ASCII 数据文件	1-6

应注意的是,以上报告的大多数结果均基于 ISO 6892-1 或同等早期标准中规定的标准,还应考虑几项试验的目的是确定共同的拉伸试验性能(例如,在 TESTAND WP2 中生成 ASCII 数据)。因此,采用了在弹性范围内具有有限精度的典型单侧 1 级准确度引伸计,并确定了应力-伸长曲线弹性部分的斜率 m_E ,目的是测定 $R_{p0.2}$ 和其他性能,而不是测定材料固有性能弹性模量 E 。如果使用本附录规定的双侧高分辨率 0.5 级准确度引伸计,测量不确定度应更小,再现性会更好。

附录 E
(规范性)

厚度 0.1 mm~<3 mm 薄板和薄带使用的试样类型

E.1 总则

对于厚度小于 0.5 mm 的产品,有必要采取特殊措施。

E.2 试样的形状

试样的夹持头部一般比其平行长度部分宽[见图 11a)]。试样头部与平行长度之间应有过渡半径至少为 20 mm 的过渡弧相连接。头部宽度应不小于 $1.2b_0$, b_0 为原始宽度。

通过协议,也可以使用不带头试样。对于宽度等于或小于 20 mm 的产品,试样宽度可相同于产品宽度。

E.3 试样的尺寸

比例试样尺寸见表 E.1

较广泛使用的三种非比例试样尺寸见表 E.2。

平行长度不应小于 $L_0 + \frac{b_0}{2}$ 。

有争议时,平行长度应为 $L_0 + 2b_0$, 除非材料尺寸不足够。

对于宽度等于或小于 20 mm 的不带头试样,除非产品标准中另有规定,原始标距(L_0)应等于 50 mm。对于这类试样,两夹头间的自由长度应等于 $L_0 + 3b_0$ 。

当对每支试样测量尺寸时,应满足表 E.3 给出的尺寸公差和形状公差。

如果试样的宽度与产品宽度相同,应该按照实际测量的尺寸计算原始横截面积(S_0)。

如果符合表 E.3 中给出的尺寸公差和形状公差,则可使用试样的名义宽度,以避免在试验前测量试样的宽度。

表 E.1 矩形横截面比例试样

单位为毫米

b_0	r	$k=5.65$			$k=11.3$		
		L_0	L_c	试样编号	L_0	L_c	试样编号
10	≥ 20	$5.65 \sqrt{S_0} \geq 15$	$\geq L_0 + b_0/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2b_0$	P1	$11.3 \sqrt{S_0} \geq 15$	$\geq L_0 + b_0/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2b_0$	P01
12.5				P2			P02
15				P3			P03
20				P4			P04

注 1: 优先采用比例系数 $k=5.65$ 的比例试样。如比例标距小于 15 mm, 采用表 B.2 的非比例试样。
注 2: 如需要, 厚度小于 0.5 mm 的试样在其平行长度上可带小凸耳以便装夹引伸计。上下两凸耳宽度中心线间的距离为原始标距。

表 E.2 矩形横截面非比例试样

单位为毫米

b_0	r	L_0	L_c			试样编号
			最小值	带头(推荐)	不带头	
12.5±1	≥20	50	57	75	87.5	P5
20±1		80	90	120	140	P6
25±1		50 ^a	60 ^a	100	120	P17

^a 宽度 25 mm 的试样其 L_c/b_0 和 L_0/b_0 与宽度 12.5 mm 和 20 mm 的试样相比非常低。这类试样得到的性能,尤其是断后伸长率(绝对值和分散范围),与其他两种类型试样不同。

表 E.3 试样宽度公差

单位为毫米

试样的名义宽度	尺寸公差 ^a	形状公差 ^b
10	± 0.05	0.06
12.5	± 0.05	0.06
15	± 0.05	0.06
20	± 0.10	0.12
25	± 0.10	0.12

^a 如果试样的宽度公差满足表 E.3,原始横截面积可以用试样宽度的名义值计算得到,而不必通过实际测量。
^b 试样整个平行长度 L_c 范围,宽度测量值的最大与最小之差。

E.4 试样的制备

制备试样不应影响其力学性能,应通过机加工方法去除由于剪切或冲切而产生的加工硬化部分材料。这些试样优先从板材或带材上制备。如果可能,应保留原轧制面。

通过冲切制备的试样,在材料性能方面会产生明显变化。尤其是屈服强度或规定延伸强度,会由于加工硬化而发生明显变化。对于呈现明显加工硬化的材料,通常通过铣和磨削等手段加工。

对于十分薄的材料,建议将其切割成等宽度薄片并叠成一叠,薄片之间用油纸隔开,每叠两侧夹以较厚薄片,然后将整叠机加工至试样尺寸。

机加工试样的尺寸公差和形状公差应符合表 E.3 的要求。例如对于名义宽度 12.5 mm 的试样,尺寸公差为 0.05 mm,表示如果用名义尺寸计算原始横截面积的标称值(S_0)无需测量试样直径且试样的宽度不应超过下面两个值之间的尺寸范围。

——12.5 mm+0.05 mm=12.55 mm;

——12.5 mm-0.05 mm=12.45 mm。

E.5 原始横截面积的测定

原始横截面积应根据试样的尺寸测量值计算得到。

原始横截面积的测定应准确到±2%。当误差的主要部分是由于试样厚度的测量所引起的,宽度的测量误差不应超过±0.2%。

为了减小试验结果的测量不确定度,建议原始横截面积应准确至或优于±1%。对于薄片材料,需要采用特殊的测量技术。

附录 F
(规范性)

直径或厚度小于 4 mm 线材、棒材和型材使用的试样类型

F.1 试样的形状

试样通常为产品的一部分,不经机加工(见图 12)。

F.2 试样的尺寸

原始标距(L_0)应取 $200\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ 或 $100\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 。试验机两夹头之间的距离应至少等于 $L_0 + 3b_0$, 或 $L_0 + 3d_0$, 最小值为 $L_0 + 20\text{ mm}$ 。见表 F.1。

表 F.1 非比例试样

单位为毫米

d_0 或 a_0	L_0	L_e	试样编号
≤ 4	100	≥ 120	R9
	200	≥ 220	R10

如果不测定断后伸长率,两夹头间的最小自由长度可以为 50 mm。

F.3 试样的制备

如以盘卷交货的产品,可进行矫直。

F.4 原始横截面积的测定

原始横截面积的测定应准确到 $\pm 1\%$ 。

对于圆形横截面的产品,应在两个相互垂直方向测量试样的直径,取其算术平均值计算横截面积。

可以根据测量的试样长度、试样质量和材料密度,按照公式(F.1)确定其原始横截面积:

$$S_0 = \frac{1\ 000 \cdot m_0}{\rho \cdot L_1} \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

m_0 —— 试样质量,单位为克(g);

ρ —— 试样材料密度,单位为克每立方厘米($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

附录 G

(规范性)

厚度等于或大于 3 mm 板材和扁材以及直径或厚度
等于或大于 4 mm 线材、棒材和型材使用的试样类型

G.1 试样的形状

通常,试样进行机加工。平行长度和夹持头部之间应以过渡弧连接,试样头部形状应适合于试验机夹头的夹持(见图 13)。夹持端和平行长度之间的过渡弧的最小半径应为:

- a) 圆形横截面试样,不小于 $0.75d_0$;
- b) 其他试样,不小于 12 mm。

如相关产品标准有规定,型材、棒材等可以采用不经机加工的试样进行试验。

试样原始横截面积可以为圆形、方形、矩形或特殊情况时为其他形状。矩形横截面试样,推荐其宽厚比不超过 8:1。

一般机加工的圆形横截面试样其平行长度的直径不应小于 3 mm。

G.2 试样的尺寸

G.2.1 机加工试样的平行长度

平行长度 L_0 应至少等于:

- a) $L_0 + \frac{d_0}{2}$ 对于圆形横截面试样;
- b) $L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$ 对于圆形横截面以外的比例试样;
- c) $L_0 + (b_0/2)$ 对于非比例试样(见表 G.3)。

对于仲裁试验,平行长度应为 $L_0 + 2d_0$ 或 $L_0 + 2\sqrt{S_0}$, 除非材料尺寸不足够。

G.2.2 不经机加工试样的平行长度

试验机两夹头间的自由长度应足够,以使试样原始标距的标记与最接近夹头间的距离不小于 $\sqrt{S_0}$ 。

G.2.3 原始标距

G.2.3.1 比例试样

通常,使用比例试样时原始标距(L_0)与原始横截面积(S_0)满足公式(G.1):

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad \dots\dots\dots (G.1)$$

其中比例系数(k)通常取值 5.65,也可以取 11.3。

圆形横截面比例试样和矩形横截面比例试样应优先采用表 G.1 和表 G.2 推荐的尺寸。

表 G.1 圆形横截面比例试样

单位为毫米

d_0	r	$k=5.65$			$k=11.3$		
		L_0	L_c	试样编号	L_0	L_c	试样编号
25	$\geq 0.75d_0$	$5d_0$	$\geq L_0 + d_0/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2d_0$	R1	$10d_0$	$\geq L_0 + d_0/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2d_0$	R01
20				R2			R02
15				R3			R03
10				R4			R04
8				R5			R05
6				R6			R06
5				R7			R07
3				R8			R08

注 1: 如相关产品标准无具体规定, 优先采用 R2、R4 或 R7 试样。
 注 2: 试样总长度取决于夹持方法, 原则上 $L_1 > L_c + 4d_0$ 。

表 G.2 矩形横截面比例试样

单位为毫米

b_0	r	$k=5.65$			$k=11.3$		
		L_0	L_c	试样编号	L_0	L_c	试样编号
12.5	≥ 12	$5.65\sqrt{S_0}$	$\geq L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$ 仲裁试验: $L_0 + 2\sqrt{S_0}$	P7	$11.3\sqrt{S_0}$	$\geq L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$ 仲裁试验: $L_0 + 2\sqrt{S_0}$	P07
15				P8			P08
20				P9			P09
25				P10			P010
30				P11			P011

注: 如相关产品标准无具体规定, 优先采用比例系数 $k=5.65$ 的比例试样。

G.2.3.2 非比例试样

如果相关的产品标准有规定, 允许使用非比例试样。矩形横截面非比例试样尺寸见表 G.3。

平行长度不应小于 $L_0 + b_0/2$ 。对于仲裁试验, 平行长度应为 $L_c = L_0 + 2b_0$, 除非材料尺寸不足。

表 G.3 矩形横截面非比例试样

单位为毫米

b_0	r	L_0	L_c	试样编号
12.5±0.5	≥12	50	≥ $L_0 + b_0/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2b_0$	P12
20±0.5		80		P13
25±0.7		200		P14
38±0.7		200		P15
40±0.7		200		P16

G.3 试样的制备

G.3.1 通则

表 G.4 给出了机加工试样的横向尺寸公差。G.3.2 和 G.3.3 给出了应用这些公差的示例。

G.3.2 尺寸公差

表 G.4 给出的值，例如对于名义直径 10 mm 的试样，尺寸公差为 ±0.03 mm，表示如果用名义尺寸计算原始横截面积的标称值(S_0)无需测量试样直径且试样的直径不应超出下面两个值之间的尺寸范围：

$$\text{—} 10 \text{ mm} + 0.03 \text{ mm} = 10.03 \text{ mm};$$

$$\text{—} 10 \text{ mm} - 0.03 \text{ mm} = 9.97 \text{ mm}.$$

G.3.3 形状公差

表 G.4 中规定的值表示，例如对于满足上述机加工条件的名义直径 10 mm 的试样，沿其平行长度最大直径与最小直径之差不应超过 0.04 mm。

因此，如试样的最小直径为 9.99 mm，它的最大直径不应超过：9.99 mm + 0.04 mm = 10.03 mm。

表 G.4 试样横向尺寸公差

单位为毫米

名称	名义横向尺寸	尺寸公差 ^a	形状公差 ^b
机加工的圆形横截面直径和四面机加工的矩形横截面试样横向尺寸	≥3 ≤6	± 0.02	0.03
	>6 ≤10	± 0.03	0.04
	>10 ≤18	± 0.05	0.04
	>18 ≤30	± 0.10	0.05

表 G.4 试样横向尺寸公差 (续)

单位为毫米

名称	名义横向尺寸	尺寸公差 ^a	形状公差 ^b
相对两面机加工的矩形横截面试样横向尺寸	≥ 3 ≤ 6	± 0.02	0.03
	> 6 ≤ 10	± 0.03	0.04
	> 10 ≤ 18	± 0.05	0.06
	> 18 ≤ 30	± 0.10	0.12
	> 30 ≤ 50	± 0.15	0.15
	^a 如果试样的公差满足表 G.4, 原始横截面积可以用试样的横向尺寸名义值计算得到, 而不必通过实际测量试样的横向尺寸。如果试样的公差不满足表 G.4, 就很有必要对每个试样的尺寸进行实际测量。 ^b 沿着试样整个平行长度, 规定横向尺寸测量值的最大与最小之差。		

G.4 原始横截面积的测定

对于圆形横截面和四面机加工的矩形横截面试样, 如果试样的尺寸公差和形状公差均满足表 G.4 的要求, 可以用名义尺寸计算原始横截面积。对于所有其他类型的试样, 应根据测量的原始试样尺寸计算原始横截面积 (S_0), 测量每个尺寸应准确到 $\pm 0.5\%$ 。

附录 H
(规范性)
管材使用的试样类型

H.1 试样的形状

试样可为全壁厚纵向弧形试样、管段试样、全壁厚横向试样,或从管壁机加工的圆形横截面试样(见图 14 和图 15)。

对于管壁厚度小于 3 mm 的机加工横向、纵向试样已在附录 E 描述;对于管壁厚度大于 3 mm 的机加工横向、纵向试样已在附录 G 描述。纵向弧形试样一般适用于管壁厚度大于 0.5 mm 的管材。

H.2 试样的尺寸**H.2.1 纵向弧形试样**

纵向弧形试样尺寸见表 H.1。相关产品标准可规定不同于表 H.1 的试样。纵向弧形试样一般适用于管壁厚度大于 0.5 mm 的管材。

为了在试验机上夹持,可压平纵向弧形试样的两头部,但不应将平行长度部分压平。

不带头的试样,两夹头间的自由长度应足够,以使试样原始标距的标记与最接近的夹头间的距离不少于 $1.5\sqrt{S_0}$ 。

表 H.1 纵向弧形试样

单位为毫米

试样	D_0	k	a_0	L_0	L_c	试样 编号	L_0	L_c	试样 编号
比例 试样	30~50	10	原始 壁厚 ≥ 12	$5.65\sqrt{S_0}$	仲裁试验: $L_0+2\sqrt{S_0}$	S1	$11.3\sqrt{S_0}$	仲裁试验: $L_0+2\sqrt{S_0}$	S01
	>50~70	15				S2			S02
	>70	20				S3			S03
非比 例试 样	≤ 100	19	≥ 12	50	—	S4	—	—	—
	>100~200	25				S5			
	>200	38				S6			

注:如相关产品标准无具体规定,采用比例系数 $k=5.65$ 的比例试样。

H.2.2 管段试样

管段试样尺寸见表 H.2。应在试样两端加塞头。塞头顶端至最接近的标距标记的距离应不小于 $D_0/4$,只要材料足够,仲裁试验时此距离为 D_0 。塞头相对于试验机夹头在标距方向伸出的长度不应超过 D_0 ,而其形状应不妨碍标距内的变形。

允许压扁管段试样两夹持头部,加或不加扁块塞头后进行试验。仲裁试验不压扁,应加配塞头。

表 H.2 管段试样

单位为毫米

L_0	L_c	试样类型编号
$5.65 \sqrt{S_0}$	$\geq L_0 + D_0/2$ 仲裁试验: $L_0 + 2D_0$	S7
50	≥ 100	S8

H.2.3 机加工的横向试样

机加工的横向矩形横截面试样,管壁厚度小于 3 mm 时,采用附录 E 的表 E.1 或表 E.2 的试样;管壁厚度大于或等于 3 mm 时,采用附录 G 表 G.2 或表 G.3 的试样。

不带头的试样,两夹头间的自由长度应足够,以使试样原始标距的标记与最接近的夹头间的距离不少于 $1.5b_0$ 。

应采用特别措施校直横向试样。

H.2.4 管壁加工的纵向圆形横截面试样

机加工的纵向圆形横截面试样应采用附录 G 的表 G.1 的试样。相关产品标准应根据管壁厚度规定圆形横截面尺寸,如无具体规定,按表 H.3 选定。

表 H.3 管壁厚度机加工的纵向圆形横截面试样

a_0 mm	采用试样
8~13	R7
>13~16	R5
>16	R4

H.3 原始横截面积的测定

H.3.1 应根据测量的原始试样尺寸计算原始横截面积(S_0),测量每个尺寸应准确到±1%。

H.3.2 管段试样、不带头的纵向或横向试样的原始横截面积可以根据测量的试样长度、试样重量和材料密度,按照公式(H.1)计算:

$$S_0 = \frac{1\,000 \cdot m}{\rho \cdot L_c} \dots\dots\dots (H.1)$$

式中:

m ——试样的重量,单位为克(g);

ρ ——试样的材料密度,单位为克每立方厘米($g \cdot cm^{-3}$)。

H.3.3 对于圆管纵向弧形试样,应按照公式(H.2)计算原始横截面积:

$$S_0 = \frac{b_0}{4} (D_0^2 - b_0^2)^{1/2} + \frac{D_0^2}{4} \arcsin\left(\frac{b_0}{D_0}\right) - \frac{b_0}{4} [(D_0 - 2a_0)^2 - b_0^2]^{1/2} - \left(\frac{D_0 - 2a_0}{2}\right)^2 \arcsin\left(\frac{b_0}{D_0 - 2a_0}\right) \dots\dots\dots (H.2)$$

式中：

b_0 ——纵向弧形试样的平均宽度， $b_0 < (D_0 - 2a_0)$ 。

简化的公式(H.3)适用于纵向弧形试样：

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } \frac{b_0}{D_0} < 0.25 \\ \text{当 } \frac{b_0}{D_0} < 0.1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} S_0 = a_0 b_0 \left[1 + \frac{b_0^2}{6D_0(D_0 - 2a_0)} \right] \\ S_0 = a_0 b_0 \end{array} \quad \dots\dots\dots(\text{H.3})$$

H.3.4 对于管段试样，应按照公式(H.4)计算原始横截面积。

$$S_0 = \pi a_0 (D_0 - a_0) \quad \dots\dots\dots(\text{H.4})$$

附录 I

(资料性)

考虑试验机系统变形情况补偿横梁位移速率的估算

公式(2)没有考虑试验机系统变形的影响,因此,公式(2)给定的横梁位移速率存在部分缺失,并将导致试样平行长度上的实际应变速率低于要求的应变速率。合理补偿(补足)横梁位移速率有可能改善实际应变速率的这种偏移。参考文献 [23] 提供了当考虑试验机系统变形情况的补偿横梁位移速率的估算方法,以改善应变速率的偏移,见公式(I.1);

$$\nu_{c,c} = (\dot{e}_{p,req} / \dot{e}_{p,m}) \nu_c \dots\dots\dots (I.1)$$

或者,当在预备实验中已测定和计算出了系数 K 的值时

$$\nu_{c,c} = K \dot{e}_{p,req} L_c \dots\dots\dots (I.2)$$

式中:

- $\nu_{c,c}$ —— 补偿横梁位移速率,单位为毫米每秒($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$);
- ν_c —— 预备试验所施加的横梁位移速率,单位为毫米每秒($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$);
- $\dot{e}_{p,m}$ —— 预备试验时在应力-应变曲线上感兴趣点(比如 $R_{p0.2}$ 点)处,通过引伸计系统测定的应变速率,单位为每秒(s^{-1});
- $\dot{e}_{p,req}$ —— 试验要求在应力-应变曲线上感兴趣点(比如 $R_{p0.2}$ 点)处的应变速率,单位为每秒(s^{-1});
- K —— 系数,按公式(I.3)定义为:

$$K = \dot{e}_{L_c} / \dot{e}_{p,m} \dots\dots\dots (I.3)$$

式中 \dot{e}_{L_c} 按公式(I.4)定义为:

$$\dot{e}_{L_c} = \nu_c / L_c \dots\dots\dots (I.4)$$

预备试验采用的试样形状、试样尺寸、试样材质和试验设备等应与正式试验的相同,预备试验横梁位移速率按照公式(2)计算确定。进行预备试验时通过力测量系统和引伸计系统分别测定应力和应变,并同时记录应力-应变曲线($R-e_p$ 曲线)和应变-时间曲线(e_p-t 曲线)。

根据应变-时间曲线,计算与应力-应变曲线上感兴趣点(比如 $R_{p0.2}$)相对应点处的曲线斜率,此斜率即为应变速率参数 $\dot{e}_{p,m}$,按照公式(I.5)计算:

$$\dot{e}_{p,m} = (de_p/dt) \cong \Delta e_p / \Delta t \dots\dots\dots (I.5)$$

然后按照公式(I.1)或公式(I.2)计算补偿横梁位移速率 $\nu_{c,c}$ 的值,正式试验中使用此补偿横梁位移速率的值。

如果为了缩短试验耗时为目的的,建议预备试验时测定 K 值的点选在材料屈服强度的 80% 处,以便有足够区间将横梁位移速率平滑转换至屈服阶段所需的横梁位移速率。

上述的补偿横梁位移速率估算方法,仅仅适用于同一批相同试样使用相同实验设备情况的重复试验。当试样和设备两者或其中之一发生改变,均需重新进行预备试验。

附录 J

(资料性)

逐步逼近方法测定规定塑性延伸强度(R_p)

J.1 概述

逐步逼近方法适用于具有无明显弹性直线段金属材料的塑性延伸强度的测定。对于力-延伸曲线图具有弹性直线段高度不低于 $0.5F_m$ 的金属材料,其塑性延伸强度的测定亦适用。逐步逼近方法可应用于这种性能的拉伸试验自动化测试。

J.2 方法

根据力-延伸曲线图测定塑性延伸强度。

试验时,记录力-延伸曲线图,至少直至超过预期的塑性延伸强度的范围。在力-延伸曲线上任意估取 A_0 点拟为塑性延伸率等于0.2%时的力 $F_{p0.2}^0$,在曲线上分别确定力为 $0.1F_{p0.2}^0$ 和 $0.5F_{p0.2}^0$ 的 B_1 和 D_1 两点,做直线 B_1D_1 。从曲线原点 O (必要时进行原点修正)起截取 OC 段($OC=0.2\% \times L_e \times n$,式中 n 为延伸放大倍数),过 C 点作平行于 B_1D_1 的平行线 CA_1 交曲线于 A_1 点。如果 A_1 与 A_0 重合, $F_{p0.2}^0$ 即为相应于塑性延伸率为0.2%时的力。

如 A_1 点未与 A_0 点重合,需要按照上述步骤进行进一步逼近。此时,取 A_1 点的力 $F_{p0.2}^1$,在曲线上分别确定力为 $0.1F_{p0.2}^1$ 和 $0.5F_{p0.2}^1$ 的 B_2 和 D_2 两点,作直线 B_2D_2 。过 C 点作平行于直线 B_2D_2 的平行线 CA_2 交曲线于 A_2 点,如此逐步逼近,直至最后一次得到的交点 A_n 与前一次的交点 A_{n-1} 重合(见图J.1)。 A_n 的力即为塑性延伸率达0.2%时的力。此力除以试样原始横截面积得到测定的塑性延伸强度($R_{p0.2}$)。

最终得到的直线 B_nD_n 的斜率,一般可以作为确定其他塑性延伸强度的基准斜率。

注:逐步逼近方法测定软铝等强度很低的材料的塑性延伸强度(R_p)时显示出不适合性。

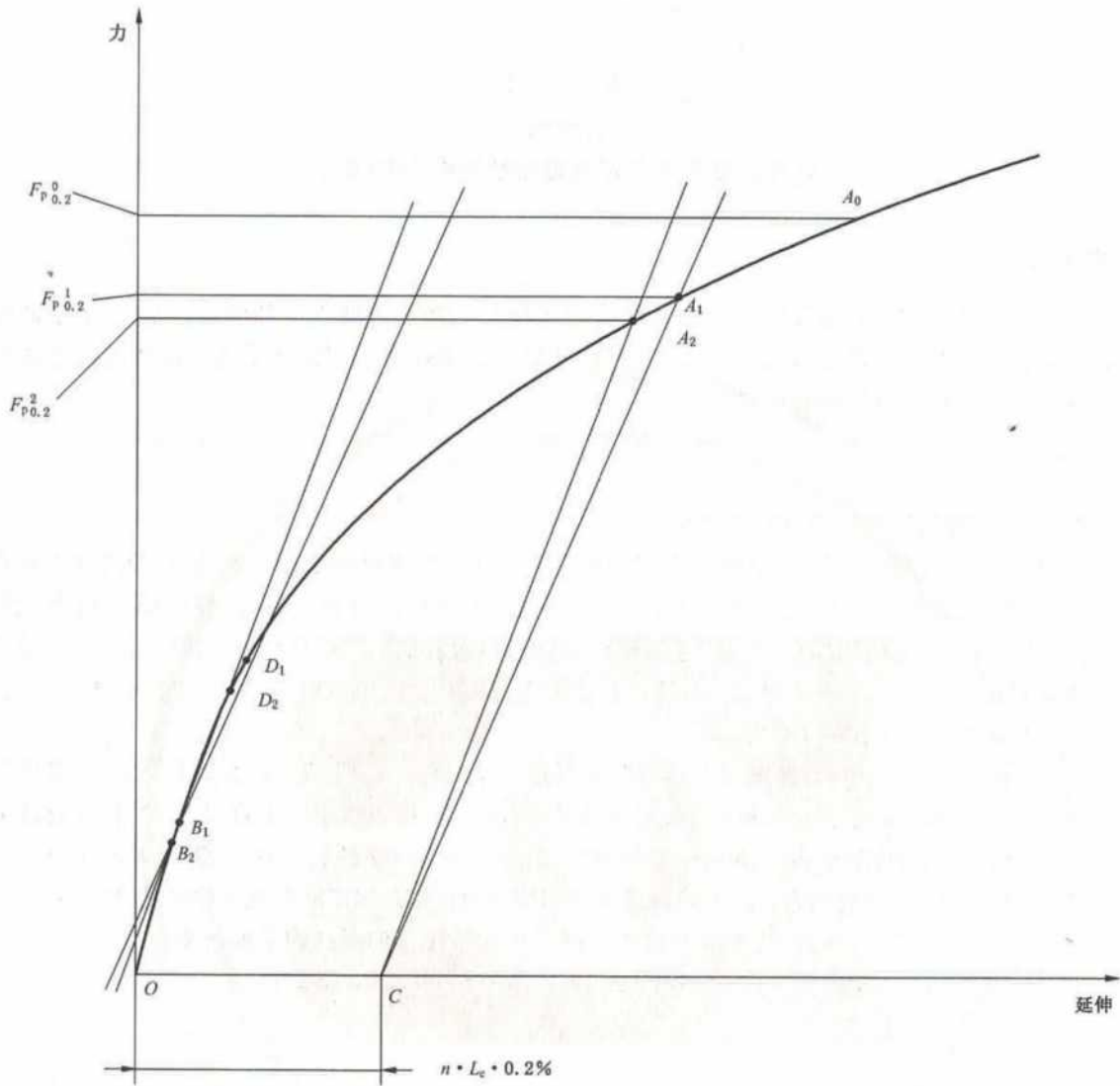


图 J.1 逐步逼近法测定塑性延伸强度

附录 K

(资料性)

卸力方法测定规定残余延伸强度($R_{r0.2}$)举例

试验材料:钢,预期的规定残余延伸强度 $R_{r0.2} \approx 800 \text{ N/mm}^2$;

试样尺寸: $d=10.00 \text{ mm}$, $S_0=78.54 \text{ mm}^2$;

引伸计:表式引伸计,1级准确度, $L_e=50 \text{ mm}$,每一分度值为 0.01 mm ;

试验机:最大量程 200 kN ,选用度盘为 100 kN ;

试验速率:按照 10.3.2.2 的规定要求。

按照预期的规定残余延伸强度计算相应于应力值 5% 的预拉力为:

$$F_0 = R_{r0.2} \times S_0 \times 5\% = 3\ 141.6 \text{ N}$$

化整后取 $3\ 000 \text{ N}$ 。此时,引伸计的条件零点为 1 分度。

使用的引伸计标距为 50 mm ,测定规定残余延伸强度($R_{r0.2}$)所要达到的残余延伸应为: $50 \text{ mm} \times 0.2\% = 0.1 \text{ mm}$,即引伸计的分度数为 10 分度。

从 F_0 起第一次施加力直至试样在引伸计标距的长度上产生总延伸(相应于引伸计的分度数)应为 11 分度~12 分度[$10+(1\sim2)$]。由于条件零点为 1 分度,总计为 13 分度。保持力 $10 \text{ s}\sim 12 \text{ s}$ 后,将力降至 F_0 ,引伸计读数为 2.3 分度,即残余延伸为 1.3 分度。

第二次施加力直至引伸计达到读数应为:在上一次读数 13 分度的基础上,加上规定残余延伸 10 分度与已得残余延伸 1.3 分度之差,再加上 1 分度~2 分度,即 23.7 分度[$13+(10-1.3)+2$]。保持力 $10 \text{ s}\sim 12 \text{ s}$,将力降至 F_0 后得到 7.3 分度的残余延伸读数。

第三次施加力直至引伸计达到的读数应为 27.4 分度[$23.7+(10-7.3)+1$]。

试验直至残余延伸读数达到或稍微超过 10 分度为止,试验记录见表 K.1。

规定残余延伸强度($R_{r0.2}$)计算如下:

由表 K.1 查出残余延伸读数最接近 10 分度的力值读数为 $61\ 000 \text{ N}$,亦即测定的规定残余延伸力应在 $61\ 000 \text{ N}$ 和 $62\ 000 \text{ N}$ 之间。用线性内插法求得规定残余延伸力为:

$$F_{r0.2} = \frac{(10.5 - 10) \times 61\ 000 + (10 - 9.7) \times 62\ 000}{(10.5 - 9.7)} = 61\ 375 \text{ N}$$

得到:

$$R_{r0.2} = \frac{61\ 375}{78.54} = 781.4 \text{ N/mm}^2$$

按照第 22 章要求,修约后结果为: $R_{r0.2} = 780 \text{ N/mm}^2$

表 K.1 力-残余延伸数据记录

力/N	施加力引伸计读数分度	预拉力引伸计读数分度	残余延伸分度
3 000	1.0	—	—
41 000	13.0	2.3	1.3
57 000	23.7	8.3	7.3
61 000	27.4	10.7	9.7
62 000	28.7	11.5	10.5

附录 L

(资料性)

棒材、线材和条材等长产品的无缩颈塑性伸长率(A_{wn})的测定方法

本方法是测量已拉伸试验过的试样最长部分。

试验前,在标距上标出等分格标记,连续两个等分格标记之间的距离等于原始标距(L'_0)的约数。原始标距(L'_0)的标记应准确到 0.5 mm 以内。断裂后,在试样的最长部分上测量断后标距(L'_0),准确到 ±0.5 mm。

为使测量有效,应满足以下条件:

- a) 测量区的范围应处于距离断裂处至少 $5d_0$ 和距离夹头至少为 $2.5d_0$;
- b) 测量用的原始标距应至少等于产品标准中规定的值。

无缩颈塑性伸长率按公式(L.1)计算:

$$A_{wn} = \frac{L'_0 - L'_0}{L'_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (L.1)$$

注:对于许多材料,最大力发生在缩颈开始的范围。这意味着对于这些材料 A_0 和 A_{wn} 基本相等。但是,对于很大冷变形的材料诸如双面减薄的锡板、辐照过的结构钢或在高温下的试验 A_0 和 A_{wn} 之间有很大不同。

附录 M

(资料性)

断后伸长率低于 5% 的测定方法

在测定小于 5% 的断后伸长率时应加倍小心。

推荐的方法如下：

试验前在平行长度的两端处做一很小的标记。使用一对针尖的分规，将半径调到标距长度，分别以标记为圆心划一圆弧。拉断后，将断裂的试样置于一装置上，最好借助螺丝施加轴向力，以使其在测量时牢固地对接在一起。以最接近断裂的原圆心为圆心，以相同的半径划第二个圆弧。用工具显微镜或其他合适的仪器测量两个圆弧之间的距离即为断后伸长，准确到 ± 0.02 mm。为使划线清晰可见，试验前可在样品表面涂上一层染料。

注：另一种方法是 20.2 规定的引伸计方法。



附录 N

(资料性)

移位法测定断后伸长率

N.1 为了避免由于试样断裂位置不符合 20.1 所规定的条件而必须报废试样,可以使用如下方法:

- a) 试验前将试样原始标距细分为 5 mm (推荐) 到 10 mm 的 N 等份;
- b) 试验后,以符号 X 表示断裂后试样短段的标距标记,以符号 Y 表示断裂试样长段的等分标记,此标记与断裂处的距离最接近于断裂处至标距标记 X 的距离。

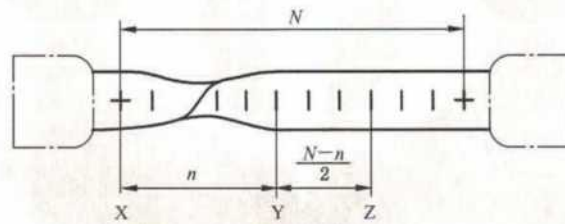
N.2 如 X 与 Y 之间的分格数为 n ,按如下测定断后伸长率:

- a) 如 $N - n$ 为偶数 [见图 N.1 a)], 测量 X 与 Y 之间的距离 l_{XY} 和测量从 Y 至距离为 $(N - n)/2$ 个分格的 Z 标记之间的距离 l_{YZ} 。按照公式(N.1)计算断后伸长率:

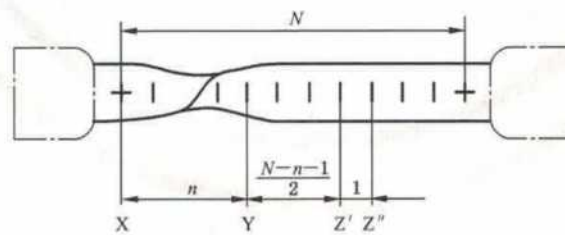
$$A = \frac{l_{XY} + 2l_{YZ} - L_0}{L_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(N.1)$$

- b) 如 $N - n$ 为奇数 [见图 N.1b)], 测量 X 与 Y 之间的距离,和测量从 Y 至距离分别为 $(N - n - 1)/2$ 和 $(N - n + 1)/2$ 个分格的 Z' 和 Z'' 标记之间的距离 $l_{YZ'}$ 和 $l_{YZ''}$ 。按照公式(N.2)计算断后伸长率:

$$A = \frac{l_{XY} + l_{YZ'} + l_{YZ''} - L_0}{L_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(N.2)$$



a) $N - n$ 为偶数



b) $N - n$ 为奇数

标引符号说明:

- n —— X 与 Y 之间的间隔数;
- N —— 等分的份数;
- X —— 试样较短部分的标距标记;
- Y —— 试样较长部分的标距标记;
- Z, Z', Z'' —— 分度标记。

注: 试样头部形状仅为示意性。

图 N.1 移位方法的图示说明

附录 O

(资料性)

测量不确定度的评定

O.1 通则

本附录给出了如何根据本文件确定的参数值的不确定度的评定指南。应注意的是,不可能给出本试验方法不确定度的绝对声明,因为不确定度声明既有材料以外的贡献,也有材料自身的贡献。ISO/IEC 指南 98-3 是一份综合性文件,超过 90 页,基于各种来源的不确定性总和的严格统计方法。它的复杂性为许多组织提供简化的版本提供了动力。这些文件都为基于“不确定度方案”概念如何评定测量不确定度提供了指导。详细描述见 EN10291 和参考文献。其他可获得的评定不确定度的信息见参考文献。此处给出的测量不确定度并不描述由材料的不均匀性引起的分散,例如从一个批次、从挤压型材或轧制卷的头部和尾部,或铸件内不同位置引起的分散。不确定度来源于从理想均质材料中提取的不同试验、不同试验机或不同实验室获得的数据的分散性。下面将对不同的影响进行阐述和指导。

表 O.2~表 O.4 中使用的再现性值是符合 ISO/IEC 指南 98-3 的半宽度间隔,应解释为正负分散的公差。

O.2 不确定度的评定

拉伸性能参数值的标准不确定度可以按照以下两种方法评定。

a) A 类——重复性测量按公式(O.1);

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots(O.1)$$

式中:

u —— 不确定度;

s —— 测量的标准偏差;

n —— 在正常情况下报告测量结果的平均观测数。

b) B 类——其他来源,如校准证书或公差。

这里,真值同样可能出现在定义的区间内的任何地方,因此分布被描述为矩形或均匀分布。标准不确定度由公式(O.2)给出。

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots(O.2)$$

其中:

a —— 假定数量的区间宽度的一半。

通常,对一个量 y 的估计涉及对其他量的测量。 y 中不确定度的估计应考虑所有这些测量中不确定度的贡献。这就是所谓的合成不确定度。如果估计仅涉及一系列测量值 $x_1, x_2 \dots x_n$ 的加或减,则 $y, u(y)$ 中的合成不确定度由公式(O.3)给出。

$$u(y) = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2} \quad \dots\dots\dots(O.3)$$

其中 $u(x_1)$ 是参数 x_1 的不确定度等。

O.3 设备参数对试验结果不确定度的影响

拉伸试验结果的不确定度包含由所用设备引起的分量。不同的测试结果有不同的不确定度分量贡

献,这取决于它们的确定方式。表 O.1 显示了拉伸试验中确定的一些更常见材料特性应考虑的设备不确定度分量贡献。某些试验结果的不确定度较低,例如上屈服强度(R_{eH})仅取决于测力和横截面积的不确定度分量,而塑性延伸强度(R_p)取决于力、延伸、标距长度、横截面积和其他参数。断面收缩率(Z),需要考虑断裂前后横截面积的测量不确定度。

表 O.1 测量装置对试验结果的不确定度影响

参数	试验结果					
	R_{eH}	R_{eL}	R_m	R_p	A	Z
力	×	×	×	×	—	—
延伸	—	—	—	×	×	—
标距	—	—	—	×	×	—
S_0	×	×	×	×	—	×
S_u	—	—	—	—	—	×

注：“×”表示相关，“—”表示不相关。

表 O.1 中所列试验结果的不确定度可从用于测定试验结果的试验装置的校准证书中得出。例如,使用经认证不确定度为 1.4% 的试验机的力参数的标准不确定度值为 1.4/2% 或 0.7%。应注意的是,1.0 级分类(用于拉伸试验机或引伸计)不一定保证不确定度为 1%。不确定度可能会明显升高或降低(例如,力见 GB/T 16825.1),应查阅设备证书。由于设备自校准以来的漂移等因素造成的不确定度贡献以及在不同环境条件下的使用也应考虑在内。

根据公式(O.3)继续示例,考虑力或引伸计测量的不确定度,使用平方和法的平方根, R_{eH} 、 R_{eL} 、 R_m 和 A 的试验结果的合成不确定度为 $\sqrt{\left(\frac{1.4}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2} = \sqrt{0.70^2 + 0.58^2} = 0.91\%$ 。在估计 R_p 的不确定度时,不宜简单地将标准不确定度分量之和应用于测量设备的分类。应检查力延伸曲线。例如,如果 R_p 的确定发生在曲线上的某一点处的力-延伸曲线上,其中力指示在延伸测量不确定度的范围内没有改变,则由于延伸测量装置而引起的力指示的不确定度是微不足道的。另一方面,如果 R_p 的测定发生在力的延伸曲线上,且力相对于延伸的变化很大,则报告的力的不确定度可能远大于由于设备分类的不确定度分量。此外,如果该范围内的曲线不是理想的直线,则应力百分比延伸曲线 m_E 的弹性部分的斜率的确定会影响 R_p 的结果。

表 O.2 由于测量装置不同,不同试验结果的不确定度分量示例

参数	不确定度分量 ^a				
	R_{eH}	R_{eL}	R_m	A	Z
力	1.4	1.4	1.4	—	—
延伸	—	—	—	1.4	—
标距, L_e, L_0	—	—	—	1	—
S_0	1	1	1	—	1
S_u	—	—	—	—	2

^a 数值仅供参考。

参数 Z 的合成标准不确定度 (u_z)，公式 (O.4) 给出了百分数的表达形式：

$$u_z = \sqrt{\left(\frac{aS_o}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{aS_u}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{0.577^2 + 1.155^2} = \sqrt{0.33 + 1.33} = 1.29$$

.....(O.4)

采用类似方法，一系列试验结果的合成标准不确定度示例如表 O.3 所示。

表 O.3 合成标准不确定度示例

不同参数的合成标准不确定度				
%				
R_{eH}	R_{eL}	R_m	A	Z
0.91	0.91	0.91	0.91	1.29

根据 ISO/IEC 指南 98-3，总扩展不确定度是通过将合成标准不确定度乘以扩展因子 (k) 获得的，对于 95% 置信水平， $k=2$ 。

表 O.4 95% 置信水平， $k=2$ 总扩展不确定度示例 (根据表 O.3)

95% 置信水平， $k=2$ 总扩展不确定度				
%				
R_{eH}	R_{eL}	R_m	A	Z
1.82	1.82	1.82	1.82	2.58

在所示计算中，只能添加具有相同单位的不确定度贡献。有关拉伸试验中测量不确定度的更多信息和详细信息，见 CWA 15261-2 和参考文献。

强烈建议定期进行样品测试，并绘制与特定材料测试相关结果的标准偏差图表。随着时间的推移，样品试验数据的结果标准偏差可以很好地显示试验数据不确定度是否在预期范围内。

O.4 取决于材料和/或试验程序的参数

拉伸试验结果的精度取决于与被测材料、试验机、试验程序和用于计算指定材料性能的方法相关的因素。理想情况下，应考虑以下所有因素：

- a) 试验温度；
- b) 试验速率；
- c) 试样几何形状与机加工；
- d) 试样的夹持方法和加力同轴度；
- e) 试验机的特性 (刚度、驱动和控制模式)；
- f) 与拉伸性能测定相关的人为和软件错误；
- g) 引伸计安装几何形状。

这些因素的影响取决于具体的材料状态，不能作为一个定值给出。如果已知影响，则可在计算 O.3 所示不确定度时将其考虑在内。在估计扩展测量不确定度时，可能会包括更多的不确定度来源。这可以使用以下方法来完成。

- a) 用户宜确定所有其他可能的来源，这些来源可能直接或间接影响要确定的测试参数。
- b) 相对贡献率可根据被测材料和特殊试验条件而变化。鼓励各实验室编制一份可能的不确定源清单，并评估其对结果的影响。如果一个不确定度源的影响被确定，这个不确定度 (u) 宜包括

在计算中。不确定度 u_i 是源 i 对以百分比形式确定的值的不确定度,如公式(O.3)所示。对于 u_i 宜识别特定参数的分布函数(正态、矩形等)。然后宜确定一西格玛水平对结果的影响。这是标准不确定度。实验室间试验可用于在接近工业实验室使用的条件下确定结果的总体不确定度,但此类试验不会将与材料不均匀性相关的影响与可归因于试验方法的影响分开(见附录 P)。

应认识到,随着合适的认证参考材料可获得,它们将提供一种估计任何给定试验机上测量不确定度的有用方法,包括目前难以量化的夹持、弯曲等的影响。经认证的标准物质的一个例子是可从 IRMM 获得的 BCR-661(Nimonic 75)(见 CWA 15261-2)。

或者,建议定期进行“内部”试验,以便对性能分散程度较低的材料(非认证参考材料)进行质量控制,见参考文献。

有些例子在没有参考材料的情况下很难给出不确定度值。当可靠的不确定度值很重要时,在某些情况下,建议使用经认证的参考材料或未经认证的参考材料来确认测量的不确定度。如果不能使用参考材料,则需要适当的相互比对练习(见参考文献)。

附录 P

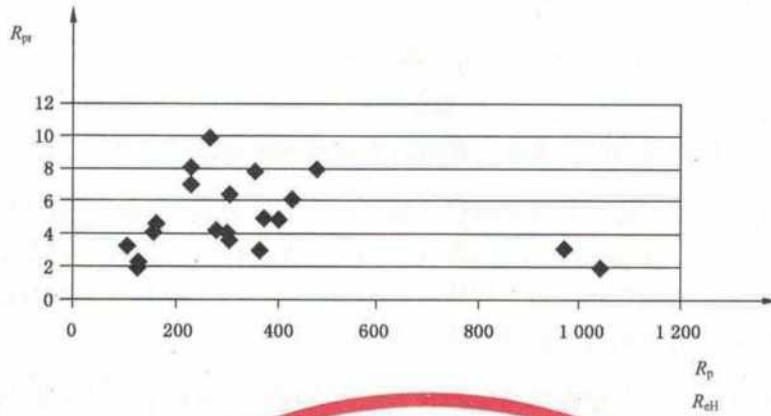
(资料性)

拉伸试验的精密度 根据实验室间试验方案的结果

在实验室间的比对实验中有迹象表明拉伸试验结果的分散性包括材料的分散和测量的不确定度,见表 P.1~表 P.4,相应的图示表达见图 P.1~图 P.4。试验结果的再现性用 2 倍各自参数,例如 R_p , R_m , Z 和 A 等参数的标准偏差除以各自的平均值得到。因此给出的这些参数结果的置信度按照 GUM 为 95%,可以直接与用其他方法得到的扩展不确定度相比较。

表 P.1 屈服强度 (0.2% 塑性延伸强度或上屈服强度) 实验室间比对试验的再现性
(图 P.1 给出了图形表达的数值)

材料	牌号	屈服强度 MPa	再现性 %	参考文献
铝板	AA5754	105.7	3.2	[39]
	AA5182-O	126.4	1.9	[28]
	AA6016-T4	127.2	2.2	[28]
	EC-H 19	158.4	4.1	[15]
	2024-T 351	362.9	3.0	[15]
钢				
薄板	DX56	162.0	4.6	[39]
低碳钢板	HR3	228.6	8.2	[41]
薄板	ZStE 180	267.1	9.9	[39]
AISI 105	P245GH	367.4	5.0	[41]
	C22	402.4	4.9	[15]
中厚板	S355	427.6	6.1	[39]
奥氏体不锈钢	SS316L	230.7	6.9	[39]
	X2CrNi18-10	303.8	6.5	[41]
	X2CrNiMo18-10	353.3	7.8	[41]
AISI 316	X5CrNiMo17-12-2	480.1	8.1	[15]
马氏体不锈钢	X12Cr13	967.5	3.2	[15]
高强度	30NiCrMo16	1039.9	2.0	[41]
镍基合金				
INCONEL 600	NiCr15Fe8	268.3	4.4	[15]
Nimonic 75	(BCR-661)	298.1	4.0	[37]
Nimonic 75	(BCR-661)	302.1	3.6	[39]



标引符号说明：

R_{eH} ——上屈服强度；

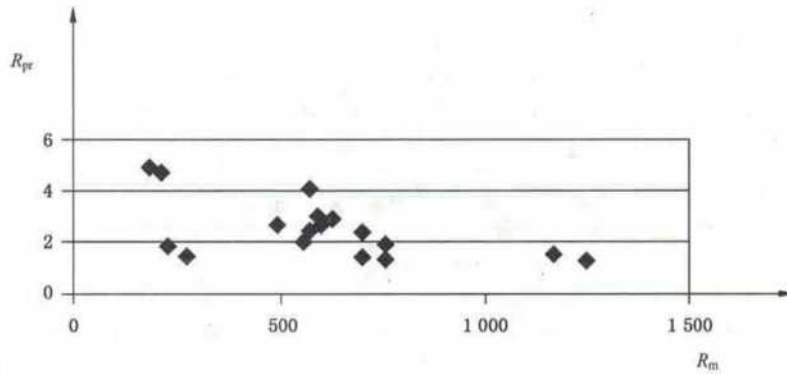
R_p ——塑性延伸强度；

R_{pr} ——再现性。

图 P.1 表 P.1 给出数据的图形表达

表 P.2 抗拉强度 R_m 实验室间对比试验的再现性(图 P.2 给出了图形表达的数值)

材料	牌号	抗拉强度 MPa	再现性 %	参考文献
铝板	AA5754	212.3	4.7	[39]
	AA5182-0	275.2	1.4	[28]
	AA6016-T4	228.3	1.8	[28]
	EC-H 19	176.9	4.9	[15]
	2024-T 351	491.3	2.7	[15]
钢				
薄板	DX56	301.1	5.0	[39]
低碳钢板	HR3	335.2	5.0	[41]
薄板	ZStE 180	315.3	4.2	[39]
AISI 105	Fe510C	552.4	2.0	[41]
	C22	596.9	2.8	[15]
中厚板	S355	564.9	2.4	[39]
奥氏体不锈钢	SS316L	568.7	4.1	[39]
	X2CrNi18-10	594.0	3.0	[41]
	X2CrNiMo18-10	622.5	3.0	[41]
AISI 316	X7CrNiMo17-12-2	694.6	2.4	[15]
马氏体不锈钢	X12Cr13	1253.0	1.3	[15]
高强钢	30NiCrMo16	1167.8	1.5	[41]
镍基合金				
INCONEL 600	NiCr15Fe8	695.9	1.4	[15]
Nimonic 75	(BCR-661)	749.6	1.9	[37]
Nimonic 75	(BCR-661)	754.2	1.3	[39]



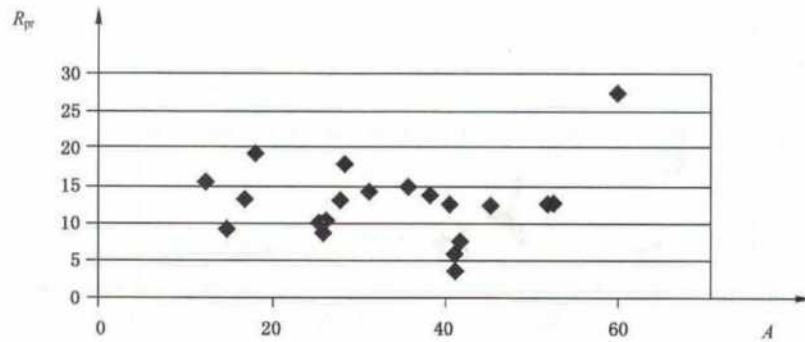
标引符号说明：
 R_m —— 抗拉强度；
 R_{pr} —— 再现性。

图 P.2 表 P.2 给出数据的图形表达

表 P.3 断后伸长率 实验室间比对试验的再现性(图 P.3 给出了图形表达的数值)

材料	牌号	断后伸长率(A) %	再现性 %	参考文献
铝板	AA5734	27.9	13.3	[39]
	AA5182-O	26.6($A_{50\%Rm}$)	10.6	[28]
	AA6016-T4	25.9($A_{50\%Rm}$)	8.4	[28]
	EC-H 19	14.6	9.1	[15]
	2024-T 351	18.0	18.9	[15]
钢				
薄板	DX56	45.2	12.4	[39]
低碳钢板	HR3	38.4	13.8	[41]
薄板	ZstE 180	40.5	12.7	[39]
AISI 105	Fe510C	31.4	14.0	[41]
	C22	25.6	10.1	[15]
中厚板	S355	28.5	17.7	[39]
奥氏体不锈钢	SS316L	60.1	27.6	[39]
奥氏体不锈钢	X2CrNi18-10	52.5	12.6	[41]
奥氏体不锈钢	X2CrNiMo18-10	51.9	12.7	[41]
AISI 316	X5CrNiMo17-12-2	35.9	14.9	[15]
马氏体不锈钢	X12Cr13	12.4	15.5	[15]
高强钢	30NiCrMo16	16.7	13.3	[41]
镍基合金				
INCONEL 600	NiCr15Fe8	41.6	7.7	[15]
Nimonic 75	(BCR-661)	41.0	3.3	[37]
Nimonic 75	(BCR-661)	41.0	5.9	[39]

* 再现性用给定材料各自的平均值 A 的百分数来表达;对于 2024-T351 铝合金 A 的绝对值是(18.0 ± 3.4)%。

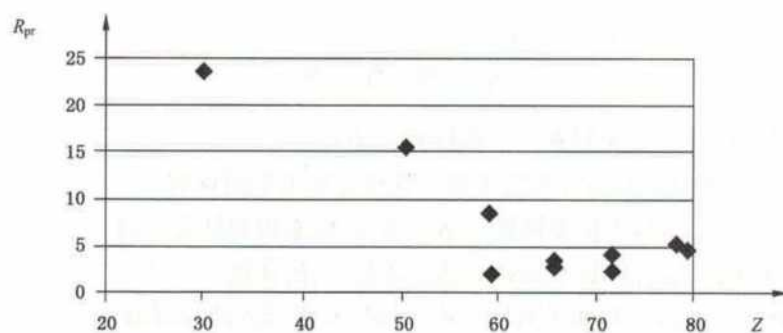


标引符号说明：
 A —— 断后伸长率；
 R_{pr} —— 再现性。

图 P.3 表 P.3 给出数据的图形表达

表 P.4 断面收缩率 Z 实验室间比对试验的再现性(图 P.4 给出了图形表达的数值)

材料	牌号	断面收缩率(Z) %	再现性 % ^a	参考文献
铝	EC-H 19	79.1	5.1	[15]
	2024-T 351	30.3	23.7(2)	[15]
钢				
低碳钢板	HR3			
AISI 105	Fe510C	71.4	2.7	[41]
	C22	65.6	3.8	[15]
奥氏体不锈钢	X2CrNi18-10			
奥氏体不锈钢	X2CrNiMo18-10	77.9	5.6	[41]
AISI 316	X5CrNiMo17-12-2	71.5	4.5	[15]
马氏体不锈钢	X12Cr13	50.5	15.6 ^b	[15]
高强钢	30NiCrMo16	65.6	3.2	[41]
镍基合金				
INCONEL 600	NiCr15Fe8	59.3	2.4	[15]
Nimonic 75	(BCR-661)	59.0	8.8	[37]
^a 再现性用给定材料各自的平均值 Z 的百分数来表达;对于 2024-T351 铝合金 Z 的绝对值是(30.3 ± 7.2)%。 ^b 某些再现性值似乎相当高;这可能是由于对于断裂的缩颈区准确地测量试样尺寸有相当的难度。对于薄板试样厚度的测量不确定度可能会很大。同样对于试样缩颈区域的直径或厚度高度地依赖于操作者的经验和试验技巧。				



标引符号说明：

R_{pr} ——再现性；

Z ——断面收缩率。

图 P.4 表 P.4 给出数据的图形表达

参 考 文 献

- [1] GB/T 228—2002 金属材料 室温拉伸试验方法
- [2] GB/T 9711—2017 石油天然气工业 管线输送系统用钢管
- [3] GB/T 17600.1 钢的伸长率换算 第1部分:碳素钢和低合金钢
- [4] GB/T 17600.2 钢的伸长率换算 第2部分:奥氏体钢
- [5] GB/T 19830—2017 石油天然气工业 油气井套管或油管用钢管
- [6] GB/T 24182—2009 金属力学性能试验 出版标准中的符号及定义
- [7] GB/T 34104 金属材料 试验机加载同轴度的检验
- [8] JJF1059.1 测量不确定度评定与表示
- [9] ISO/IEC Guide 98-3 Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM;1995)
- [10] ISO/TTA 2 Tensile tests for discontinuously reinforced metal matrix composites at ambient temperatures
- [11] ASTM A370 Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products
- [12] ASTM E8M Standard test methods for tension testing of metallic materials
- [13] ASTM E 111 Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus
- [14] ASTM E1012 Standard practice for verification of test frame and specimen alignment under tensile and compressive axial force application
- [15] ASTM Research Report E 28 1004:1994 Round robin results of interlaboratory tensile tests
- [16] CWA 15261-2: 2005 Measurement uncertainties in mechanical tests on metallic materials— Part 2: The evaluation of uncertainties in tensile testing
- [17] DIN 50125 Testing of metallic materials—Tensile test pieces
- [18] EN 10291 Metallic materials—Uniaxial creep testing in tension—Methods of test
- [19] IACS W2, Test specimens and mechanical testing procedures for materials. In: Requirements concerning materials and welding, pp. W2-1 to W2-10. International Association of Classification Societies, London, 2003. Available (2008-06-26) at: http://www.iacs.org.uk/document/public/publications/unified_requirements/pdf/ur_w_pdf159.pdf
- [20] JIS Z2241 Test pieces for tensile test for metallic materials
- [21] NIS 80:1994 Guide to the expression of uncertainty in testing
- [22] NIS 3003:1995. The expression of uncertainty and confidence in measurement
- [23] 高天胤,高怡斐,王春华,等.TC11 钛合金几种不同横梁位移速率下拉伸试验的 K 值关系分析[J].中国测试,2021,47(272),03:159-162
- [24] 高怡斐,梁新帮.按照 ISO 6892-1:2019 附录 G 方法评定弹性模量的测量不确定度[J].理化检验:物理分册,57(4):6
- [25] Dean G.D., Loveday M.S., Cooper P.M., Read B.E., Roebuck B., Morrell R., Aspects of modulus measurement. In: Dyson, B.G., Loveday, M.S., Gee, M.G., editors. Materials metrology

and standards for structural performance, pp. 150-209. Chapman & Hall, London, 1995

[26] Roebuck B., Lord J.D., Cooper P.M., McCartney L.N., Data acquisition and analysis of tensile properties for metal matrix composites. *J. Test. Eval.* 1994, 22 (1) pp. 63-69

[27] Sonne H.M., Hesse B., B. Determination of Young's modulus on steel sheet by computerised tensile test—Comparison of different evaluation concepts. In: *Proceedings of Werkstoffprüfung [Materials testing]* 1993. DVM, Berlin

[28] Aegerter J., Keller S., Wieser D., Prüfvorschrift zur Durchführung und Auswertung des Zugversuches für Al-Werkstoffe [Test procedure for the accomplishment and evaluation of the tensile test for aluminium and aluminium alloys]. In: *Proceedings of Werkstoffprüfung [Materials testing]* 2003, pp. 139-150. Stahleisen, Düsseldorf

[29] Rides M., Lord J., TENSTAND final report, Computer-controlled tensile testing according to EN 10002-1: Results of a comparison test programme to validate a proposal for an amendment of the standard. National Physical Laboratory, Teddington, 2005

[30] Lord J., Loveday M.S., Rides M., McEntaggart I., TENSTAND WP2 final report: Digital tensile software evaluation: Computer controlled tensile testing machines validation of European Standard EN 10002-1. National Physical Laboratory, Teddington, 2005, 68 p. Available at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/3224/>

[31] Taylor B.N., Kuyatt C.E., Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results. NIST, Gaithersburg, MD, 1994. 25 p. (NIST Technical Note 1297.) Available (2009-07-23) at: <http://physics.nist.gov/Pubs/guidelines/TN1297/tn1297s.pdf>

[32] Loveday M.S., Room temperature tensile testing: A method for estimating uncertainty of measurement. National Physical Laboratory, Teddington, 1999. [Measurement note CMMT (MN) 048.] Available (2009-07-23) at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/2438/>

[33] Bell S.A., 1999. A beginners guide to uncertainty of measurement, 2nd edition. National Physical Laboratory, Teddington, 2001. 41 p. (Measurement Good Practice Guide, No. 11.) Available (2009-07-31) at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/1568/>

[34] Birch K., Estimating uncertainties in testing. National Physical Laboratory, Teddington, 2001. (Measurement Good Practice Guide, No. 36.) Available (2009-07-23) at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/2022/>

[35] 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]. EC, Brussels

[36] Sonne H. M., Knauf G., Schmidt-Zinges J., überlegungen zur überprüfung von Zugprüfmaschinen mittels Referenzmaterial [Considerations on the examination of course test equipment by means of reference material]. In: *Proceedings of Werkstoffprüfung [Materials testing]* 1996. Bad Nauheim. DVM, Berlin

[37] Ingelbrecht C.D., Loveday M.S., The certification of ambient temperature tensile properties of a reference material for tensile testing according to EN 10002-1: CRM 661. EC, Brussels, 2000. (BCR Report EUR 19589 EN.)

[38] Li H.-P., Zhou X., New Consideration on the uncertainty evaluation with measured values of steel sheet in tensile testing. In: *Metallurgical analysis, 12th Annual Conference of Analysis Test*

of Chinese Society for Metals, 2004

[39] Klingelhoffer H., Ledworuski S., Brookes S., May T., Computer controlled tensile testing according to EN 10002-1—Results of a comparison test programme to validate a proposal for an amendment of the standard—Final report of the European project TENSTAND—Work Package 4. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2005. 44 p. (Forschungsbericht [Technical report]268.) Available (2008-07-01) at: http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen_medien/fb268_vt.pdf

[40] Loveday M.S., Gray T., Aegerter J., Tensile testing of metallic materials—A review—Final report of the TENSTAND project of work package 1. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2004

[41] Roesch L., Coue N., Vitali J., di Fant M., Results of an interlaboratory test programme on room temperature tensile properties—Standard deviation of the measured values. (IRSID Report, NDT 93310.)

[42] Loveday M.S., Towards a tensile reference material. In: Loveday, M.S., Gibbons, T.B. Harmonisation of testing practice for high temperature materials. Elsevier, London, pp. 111-53.

[43] Johnson R.F., Murray J.D., The effect of rate of straining on the 0.2% proof stress and lower yield stress of steel. In: Proceedings of Symposium on High Temperature Performance of Steels, Eastbourne, 1966. Iron and Steel Institute, 1967

[44] Gray T.G.F., Sharp J., Influence of machine type and strain rate interaction in tension testing. In: Papirno, R., Weiss, H.C. Factors that affect the precision of mechanical tests. ASTM, Philadelphia, PA. (Special Technical Publication 1025.)

[45] Aegerter J., Bloching H., Sonne H.-M., Influence of the testing speed on the yield/proof strength—Tensile testing in compliance with EN 10002-1. *Materialprüfung*. 2001, 10 pp. 393-403

[46] Aegerter, J. Strain rate at a given point of a stress/strain curve in the tensile test [Internal memorandum], VAW Aluminium, Bonn, 2000

[47] Bloching H., Calculation of the necessary crosshead velocity in mm/min for achieving a specified stress rate in MPa/s. Zwick, Ulm, 2000, 8 p. [Report]

[48] McEnteggart I., Lohr R.D., Mechanical testing machine criteria. In: Dyson, B.G., Loveday, M.S., Gee, M.G., editors, Materials metrology and standards for structural performance, pp. 19-33. Chapman & Hall, London, 1995

[49] Austin T., Bullough C., Leal D., Gagliardi D., Loveday M., A Guide to the Development and Use of Standards Compliant Data Formats for Engineering Materials Test Data, CEN CWA 16200:2010: ftp://ftp.cen.eu/CEN/Sectors/List/ICT/CWAs/CWA16200_2010_ELSSI.pdf

[50] SEP 1235, Determination of the modulus of elasticity on steels by tensile testing at room temperature, Stahl-Eisen-Prüfblatt (SEP) des Stahlinstituts VDEh, Düsseldorf

[51] Lord J.D., Orkney L.P., Elevated Temperature Modulus Measurements Using the Impulse Excitation Technique (IET). NPL Measurement Note CMMT. MN, 2000, pp. 049. Available at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/3249/>

[52] Lord J.D., Orkney L.P., Measurement Good Practice Guide No. 98 Elastic Modulus Measurement, ISSN 1744-3911 (2006). Available at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/3782/>

[53] Carpenter M*, Nunn J, Impulse Excitation Modulus measurements of Hardmetal Rods

using custom software on a standard personal computer and microphone. Mater. Eval. 2012, 70 (7) pp. 863-871

[54] Gabauer W, The Determination of Uncertainties in Tensile Testing UNCERT COP 07; 2000

[55] Bullough C. K, The Determination of Uncertainties in Dynamic Young's Modulus UNCERT CoP 13;2000

[56] Lord J., Rides M., Loveday M., Modulus Measurement Methods TENSTAND WP3 Final Report NPL REPORT DEPC MPE 016 Jan 2005. ISSN 1744-0262. Available at: <http://eprintspublications.npl.co.uk/3223/>

[57] Unwin, W. C., The testing of materials of construction. Longmans, Green & Co, London, 1910, pp. 237-238.

[58] Lord J.D., Roebuck B., Orkney L.P., Validation of a draft tensile testing standard for discontinuously reinforced MMC, VAMAS Report No.20, National Physical Laboratory, May 1995

[59] Aegerter J., Frenz H., Kühn H.-J., Wei-müller C., ISO 6892-1;2009 Tensile Testing: Initial Experience from the Practical Implementation of the New Standard, Carl Hanser Verlag, München, Vol. 53, (2011) 10, pp. 595-603, correction of Fig. 6 in Carl Hanser Verlag, München, Vol. 53, (2011) 11

[60] Wei-müller C., Frenz H., Measurement Uncertainty for the Determination of Young's Modulus on Steel, Materials Testing, Carl Hanser Verlag, München, 2013, Vol. 55 No. 9, pp. 643-647, available at: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/pdf/10.3139/120.110482>

[61] Ronald E. Walpole, Raymond H. Myers., Probability and Statistics for Engineers and Scientists . MACMILLAN PUBLISHING CO., INC. NEW YORK
