



中华人民共和国国家标准

GB/T 38841—2020/IEC 61788-19:2013

力学性能测量 反应后的 Nb_3Sn 复合超导线室温拉伸试验方法

Mechanical properties measurement—Room temperature tensile test of
reacted Nb_3Sn composite superconductors

(IEC 61788-19: 2013, Superconductivity—Part 19: Mechanical properties
measurement—Room temperature tensile test of reacted
 Nb_3Sn composite superconductors, IDT)

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 原理	2
5 装置	2
5.1 总则	2
5.2 试验机	2
5.3 引伸计	3
6 试样制备	3
6.1 总则	3
6.2 试样长度	3
6.3 绝缘层去除	3
6.4 横截面积(S_0)测量	3
7 测试条件	3
7.1 试样夹持	3
7.2 引伸计安装	3
7.3 测试速度	4
7.4 测试	4
8 结果计算	5
8.1 弹性模量(E)	5
8.2 0.2%规定塑性延伸强度($R_{p0.2-0}$ 和 $R_{p0.2-U}$)	6
9 测量不确定度	6
10 测试报告	6
10.1 试样	6
10.2 结果	7
10.3 测试条件	7
附录 A (资料性附录) 第 1 章~第 10 章的相关附加信息	8
附录 B (资料性附录) 不确定度考虑	18
附录 C (资料性附录) 力学测试相关范例	22
参考文献	29

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用 IEC 61788-19:2013《超导电性 第 19 部分:力学性能测量 反应后的 Nb₃Sn 复合超导线室温拉伸试验方法》。

与本标准中规范性引用文件有一致性对应关系的我国文件如下:

- GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法(ISO 6892-1:2009, MOD)
- GB/T 2900.100—2017 电工术语 超导电性(IEC 60050-815:2015, IDT)
- GB/T 12160—2019 金属材料 单轴试验用引伸计系统的标定(ISO 9513:2012, IDT)
- GB/T 13634—2019 金属材料 单轴试验机检验用标准测力仪的校准(ISO 376:2011, IDT)
- GB/T 16825.1—2008 静力单轴试验机的检验 第 1 部分:拉伸和(或)压力试验机 测力系统的检验与校准(ISO 7500-1:2004, IDT)

本标准做了下列编辑性修改:

- 修改了标准名称。

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这些专利的责任。

本标准由中国科学院提出。

本标准由全国超导标准化技术委员会(SAC/TC 265)归口。

本标准起草单位:西部超导材料科技股份有限公司、广东电网有限责任公司、中国科学院物理研究所、中国科学院高能物理研究所、中国科学院电工研究所。

本标准主要起草人:郭强、宋萌、冯冉、李洁、李超、徐庆金、孙万硕。

引 言

Cu/Nb₃Sn 超导线是多芯复合超导材料,可以采用不同的方法制备:第一种是青铜法,将 Nb/Nb 合金细丝嵌入青铜基体、阻隔层和铜稳定体中。第二种是内锡法,由含储锡层的多芯细丝、阻隔层和铜稳定体组成。第三种是粉末装管法,Nb/Nb 合金管内填充富锡粉末,并嵌入铜稳定体中。

所有类型的 Nb₃Sn 复合线的制备工艺共同点是,达到最终成品线尺寸后,需经过数天热处理形成 Nb₃SnA15 相,热处理可以是一次或多次且最后一次热处理温度在 640 °C 左右或以上。该超导相很脆,易导致芯丝断裂,并伴随着超导性能的降低。

商业复合超导线具有高电流密度和小横截面积的特点,其主要应用于制作超导磁体,可以将超导体绕制在骨架上,然后与骨架一起进行热处理(先绕制后反应),也可以先把超导体进行热处理,然后再绕制成磁体(先反应后绕制)。绕制磁体时,复杂的应力会施加在磁体绕组上,因此在实际制造过程中,较少采用先反应后绕制的方法。

如果需要测试反应之前的、尚未形成超导相的复合超导体的力学性能,也可以采用本标准,或者采用 IEC 61788-6。

当磁体通电励磁时,由于超导线的电流密度大,导线上会受到很大的电磁力。若采用先反应后绕制的磁体制备方法,绕组的应变和应力水平将受到很大的限制。

因此,确定反应后的处于超导相的 Nb₃Sn 复合超导线的力学性能是制作超导磁体的先决条件。

力学性能测量 反应后的 Nb₃Sn 复合超导线室温拉伸试验方法

1 范围

本标准规定了反应后的 Cu/Nb₃Sn 复合超导线室温拉伸试验方法原理、装置、试样制备、测试条件、结果计算、测量不确定度、测试报告。

本试验方法用于通过应力-应变曲线来测量弹性模量和规定塑性延伸强度(由复合体中铜和铜锡组分的屈服而产生)。

另外,弹性极限、抗拉强度、断后伸长率可由本方法测量。根据国际循环比对试验报告,弹性极限和断后伸长率的测量具有很大不确定度,因此,这些物理量为选测。

本标准适用于测量横截面积在 0.15 mm²~2.0 mm²,铜-非铜体积比在 0.2~1.5 之间的圆形或矩形截面的无绝缘覆层试样。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 376 金属材料 单轴试验机检验用标准测力仪的校准 (Metallic materials—Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines)

ISO 6892-1 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 7500-1 金属材料 静力单轴试验机的检验 第 1 部分:拉伸和(或)压力试验机 测力系统的检验与校准 (Metallic materials—Verification of static uniaxial testing machines—Part 1: Tension/compression testing machines—Verification and calibration of the force-measuring system)

ISO 9513 金属材料 单轴试验用引伸计的标定 (Metallic materials—Calibration of extensometers used in uniaxial testing)

IEC 60050(所有部分) 国际电工术语 (International electrotechnical vocabulary)

3 术语和定义

IEC 60050-815 和 ISO 6892-1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

拉伸应力 tensile stress

R

试验期间任一时刻的拉力除以试样原始横截面积之商。

3.2

应变 strain

A

试验期间任一时刻的位移增量除以引伸计的初始标距之商。

3.3

弹性模量 modulus of elasticity

E

弹性形变区内应力-应变曲线线性部分的梯度。

3.4

引伸计标距 extensometer gauge length

用引伸计测量试样延伸时所使用引伸计初始标距长度。

3.5

夹头间距 distance between grips

L_g

夹头之间的长度,夹头用于在测试前固定被测试样。

3.6

0.2%规定塑性延伸强度 0.2% proof strength

$R_{p0.2}$

延性材料屈服为 0.2%时的应力值。

注:指定屈服强度, $R_{p0.2-0}$ 和 $R_{p0.2-U}$ 分别对应于图 1 a)中点 A 和点 C,点 C 为 0.3%~0.4%之间卸载斜率线 U 平移至 0.2%处,与应力应变曲线的交点。认为这个强度代表复合材料的 0.2%规定塑性延伸强度。

3.7

抗拉强度 tensile strength

R_m

最大测试拉力所对应的拉伸应力。

3.8

弹性极限应力 tensile stress at elastic limit

$R_{elasticmax}$

弹性变形向塑性变形转变时拉力除以原始横截面积之商。

3.9

弹性极限应变 strain at elastic limit

$A_{elasticmax}$

弹性变形向塑性变形转变时的应变。

注:弹性极限应力 $R_{elasticmax}$ 和相应的弹性极限应变 $A_{elasticmax}$ 指附录 A 中图 A.6 的弹塑性转变点 G 点。

4 原理

试验是用超过弹性变形区域的拉力拉伸试样,以测定弹性模量(E)和规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 。

5 装置

5.1 总则

试验机和引伸计应分别符合 ISO 7500-1 和 ISO 9513。标定工作应符合 ISO 376。本标准的特殊要求见 5.2~5.3。

5.2 试验机

应使用可提供恒定横梁位移速率控制系统的拉伸机。夹头应具有适用于试样的结构和强度,并且

应能和试验机有效地连接。夹头应具有采用挫、滚花或其他方式产生的粗糙表面,保证试样在测试过程中不会滑动。夹头可以是螺纹型、气动型或者液压型驱动。

5.3 引伸计

根据线材直径,引伸计的质量应小于或等于 30 g,从而不会影响到反应后变脆的超导线的力学性能。引伸计的质量应相对超导线对称平衡,从而避免任何偏中心线力(参见附录 A 中 A.2)。应注意不要在试样上引入弯曲力矩。

本测试方法能测量的物理量取决于所选用的应变测量方法。当采用传统的单引伸计系统时,推荐测量 E_U 和 $R_{p0.2-U}$ 。而当采用双引伸计系统取平均值时,能够对反应后样品的弯曲效应进行补偿并准确测量弹性模量 E_0 ,因此可以测量本标准描述的所有物理量。

注:更多的信息参见 A.2 和 A.3。

6 试样制备

6.1 总则

线材试样在热处理前应矫直,并装入内径比线径略大的陶瓷或石英管中。

热处理炉恒温区长度应大于 6.2 规定的总长度。

将反应后的试样从陶瓷和石英管中人工取出和装样时,应注意避免引入弯曲或预载。

6.2 试样长度

试样总长度应为夹头间距加上两个夹头的夹持长度。夹头间距应大于或等于 60 mm,以便安装引伸计。

6.3 绝缘层去除

如果测试试样表面覆有绝缘材料,应在热处理前去除。可采用化学方法或机械方法,但应注意不要破坏试样表面(参见 A.7)。

6.4 横截面积(S_0)测量

绝缘层去除后,应使用千分尺或其他测量尺寸的装置来确定其横截面积。圆导线横截面积应采用两个正交直径的算术平均值计算。矩形导线横截面积从厚度和宽度之积得出,横截面积导角部分的修正则需经相关方商讨确定(参见 A.8)。

7 测试条件

7.1 试样夹持

试样安装在拉伸机的夹头上,安装时应使试样和拉力加载轴在一条直线上。试样夹持方法参见 A.9。

7.2 引伸计安装

安装引伸计时,应小心防止试样发生变形。引伸计应安装在两个夹头间距的中部,调节测量方向与试样轴向一致。

在安装过程中应注意不要预加载试样。安装完毕后,应进行物理归零。

双引伸计应相对横截面对称安装,使得应变均匀化以抵消弯曲效应。

为保证矩形线获得最佳应力-应变曲线特性,引伸计的安装应保证可在线材的窄边上对称测量应变。

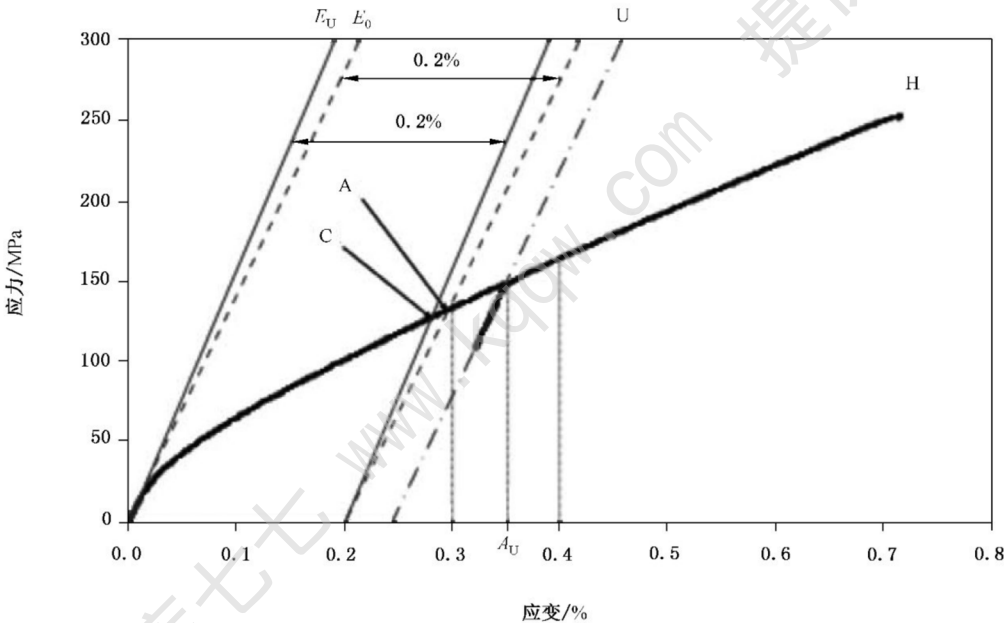
7.3 测试速度

拉伸试验采用位移控制。推荐拉伸机横梁位移速率设置为 0.1 mm/min~0.5 mm/min。

7.4 测试

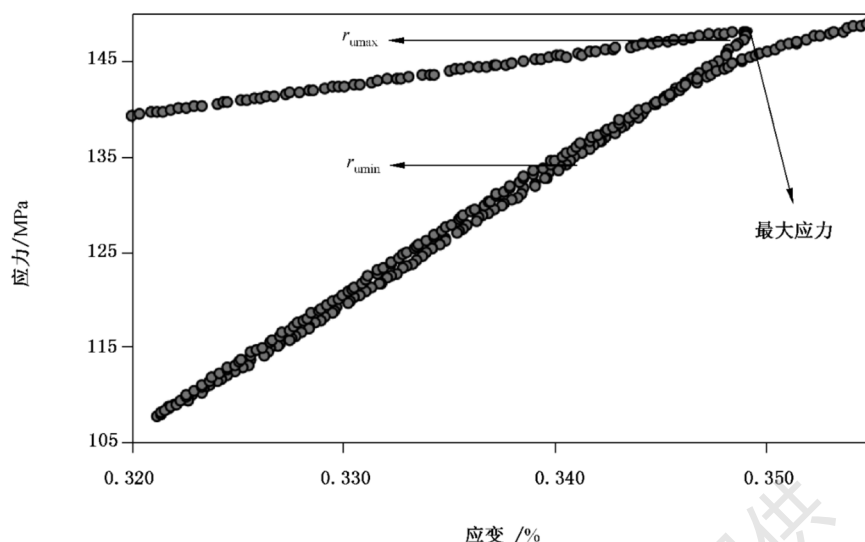
横梁位移速率设定为规定值后,启动拉伸机。将来自引伸计和载荷传感器的数据记录、保存并分别绘制在坐标纸的横、纵坐标上,如图 1 a)和图 1 b)所示。当总应变达到 0.3%~0.4%之间时,在横梁位移速率保持不变的条件下减小 30%~40%拉力。然后再次增加拉力直到试样最终断裂。

在任何材料的试验程序开始之前,建议用相似尺寸的已知弹性性能的线材核查全套实验设备(参见 A.14)。



a) 应力-应变曲线全视图

图 1 Cu/Nb₃Sn 线的应力-应变曲线、弹性模量和 0.2%规定塑性延伸强度的定义



b) 卸载和重新加载过程放大视图

说明:

U ——在应变 0.3%~0.4% 之间采用一阶线性回归计算卸载线 U, 参见图 1 a);

A 点——初始加载线(零偏移线)平移至 0.2%。试验获得 $R_{p0.2-0}$;

C 点——卸载线斜率拟合的曲线 U(如 $U_{0.35}$) 平移至 0.2%。计算获得 $R_{p0.2-U}$;

H 点——线材的最终断裂点。

初始加载线的斜率通常小于卸载线的斜率。这种情况下, 绘制横坐标 0.2% 处的偏移线以获得复合线 0.2% 规定塑性延伸强度($R_{p0.2-0}$), 规定塑性延伸强度是由延性材料铜或青铜屈服(A 点)产生的。A 点由初始加载线获得。

C 点由卸载线获得。在 0.3%~0.4% 之间卸载线斜率线应平移至拟合曲线起始点, 可能包含负应变偏移(参见 A.6)。该斜率线平移至 0.2% 应变处与拟合曲线交叉于 C 点, 定义为复合线的 0.2% 规定塑性延伸强度($R_{p0.2-U}$)。

图 1 b) 所示卸载区域的原始数据。斜率应由卸载开始的最大应力的 99% 和 90% 之间的拟合直线确定(参见 8.1)。

图 1 (续)

8 结果计算

8.1 弹性模量(E)

弹性模量应采用公式(1)和初始加载线或卸载线的线性部分计算。宜采用合适的数据评估软件对绘制的数据进行后期分析, 软件应能放大应力-应变图, 特别是预期线性偏离的区域。

$$E = \Delta F / S_0 \Delta A \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

E ——弹性模量;

ΔF ——相应的拉力增量;

ΔA —— ΔF 对应的应变增量;

S_0 ——试样原始横截面积。卸载过程从图 1 a) 中 A_U 点指示的应变开始, 卸载弹性模量(E_U)和初始加载弹性模量(E_0)均由同一公式(1)获得。卸载曲线测量建议从 A_U 点开始, A_U 推荐在 0.3%~0.4% 之间。

从卸载曲线测定的弹性模量表示为 E_U , 可从图 1 a) 中的卸载斜率线(直线 U 在 0.3%~0.4% 应变之间)获得, 从初始加载线测定的弹性模量表示为 E_0 , 可从零偏移线获得。

然而,应当指出初始应力-应变曲线的直线段非常窄,参见图 A.6。测量具有较低相对标准不确定度的弹性模量,目前唯一可行的技术是采用均化双引伸计系统,从这个意义上说,本标准中 E_U 应为代表性数据,而 E_0 仅当采用均化双引伸计系统测量时才应报告。

测试结束后,应用 E_0/E_U 比值检验测量结果。该比值应满足公式(2)的条件,其中 $\Delta=0.3$ (参见 A.12)。

$$\Delta < E_0/E_U < 1 + \Delta \quad \dots\dots\dots (2)$$

如果不满足该条件,判定测量无效。然后应对照本试验方法,检查试验过程后重新测量。

卸载-重新加载过程如下:当加载曲线达到应变 A_U (0.3%~0.4%)时,开始卸载(r_{umax} 卸载开始位置的应力),降低应力至 r_{umin} 然后重新加载。卸载曲线斜率由应力 r_{umax} 和 r_{umin} 之间的线性部分获得。

注: r_{umax} 是最大应力(卸载开始的应力)的 99%, r_{umin} 是卸载开始时应力的 90%,见图 1 b)。

8.2 0.2%规定塑性延伸强度($R_{p0.2-0}$ 和 $R_{p0.2-U}$)

复合线的 0.2%规定塑性延伸强度应通过应力-应变曲线的卸载/重新加载获初始加载部分获得,如图 1 a)和图 1 b)所示。

复合线卸载条件下的 0.2%规定塑性延伸强度 $R_{p0.2-U}$ 应由以下方法确定:卸载斜率的线性部分平移至拟合曲线起点,可包含负应变值。然后,平行线从该应变点移至横坐标 0.2%,U 线与应力-应变曲线交叉于 C 点,定义为卸载条件下的 0.2%规定塑性延伸强度。根据卸载线[如图 1 a)中 $U_{0.35}$],确定 0.2%规定塑性延伸强度($R_{p0.2-U}$)。

复合线的加载条件下的 0.2%规定塑性延伸强度 $R_{p0.2-0}$ 应由以下方法确定:应力-应变曲线加载部分在零偏移处的初始线性部分沿应变轴平移 0.2%,与应力-应变曲线相交于 A 点,定义为加载条件下的 0.2%规定塑性延伸强度。

每个 0.2%规定塑性延伸强度值应由公式(3)计算:

$$R_{p0.2-i} = F_i / S_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$R_{p0.2-i}$ ——每点的 0.2%规定塑性延伸强度,单位为兆帕(MPa);

F_i ——每点的拉力,单位为牛顿(N);

$i=0$ 或 U 。

9 测量不确定度

除非另有规定,测量应在 283 K~308 K 温度范围内进行。应使用从零到最大载荷之间的相对标准不确定度小于 0.1%的载荷传感器。引伸计的相对标准不确定度应小于 0.05%。位移测量传感器[如 LVDT(线性差示变压器)]的相对标准不确定度应小于 0.01%。

由十一个代表性研究小组参加的国际循环比对试验确定的弹性模量 E_0 和 E_U 以及规定塑性延伸强度 $R_{p0.2-0}$ 和 $R_{p0.2-U}$ 的相对标准不确定度值列于表 A.1。

根据国际循环比对试验的报告^[9],经鉴定合格后的试验数据, $N=17$ 时, E_0 的相对标准不确定度是 1.4%。相似的, $N=15$ 时, E_U 的相对标准不确定度是 1.3%; $N=17$ 时, $R_{p0.2-0}$ 的相对标准不确定度是 1.5%; $N=13$ 时, $R_{p0.2-U}$ 的相对标准不确定度是 2.5%。

10 测试报告

10.1 试样

应报告以下信息:

- a) 试样制造商；
 - b) 分类和/或标识；
 - c) 批号；
- 以下信息如果有应报告：
- d) 原材料和化学成分；
 - e) 线材横截面形状和尺寸；
 - f) 芯丝直径；
 - g) 芯丝数量；
 - h) 铜-非铜体积比。

10.2 结果

应报告以下力学性能结果：

- a) 弹性模量(E_0 和 E_U)；
- b) 0.2%规定塑性延伸强度($R_{p0.2-0}$ 和 $R_{p0.2-U}$)；

以下信息如果有应报告：

- c) 最大拉伸应力 $R_{\text{elasticmax}}$ ；
- d) 最大弹性应变 $A_{\text{elasticmax}}$ ；
- e) 抗拉强度(R_m)；
- f) 断后伸长率(A)；
- g) 函数拟合法确定的 0.2%规定塑性延伸强度($R_{p0.2-F}$)。

10.3 测试条件

应报告以下信息：

- a) 横梁位移速率；
- b) 夹头间距；
- c) 温度；
- d) 试验机制造商和型号；
- e) 引伸计制造商和型号；
- f) 夹持方式。

附录 A

(资料性附录)

第 1 章~第 10 章的相关附加信息

A.1 总则

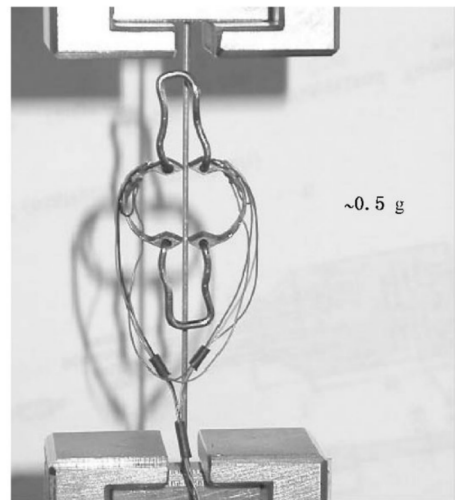
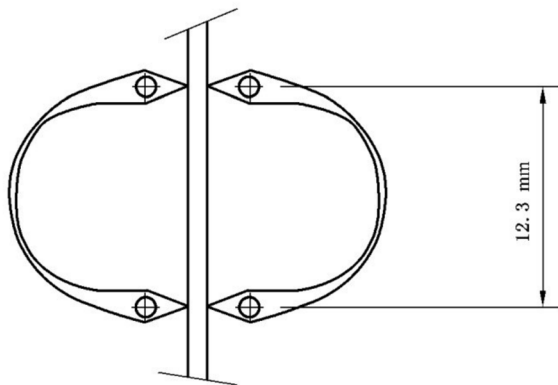
本附录给出了影响拉伸测试方法的各种因素的参考信息。

A.2 引伸计

A.2.1 双引伸计

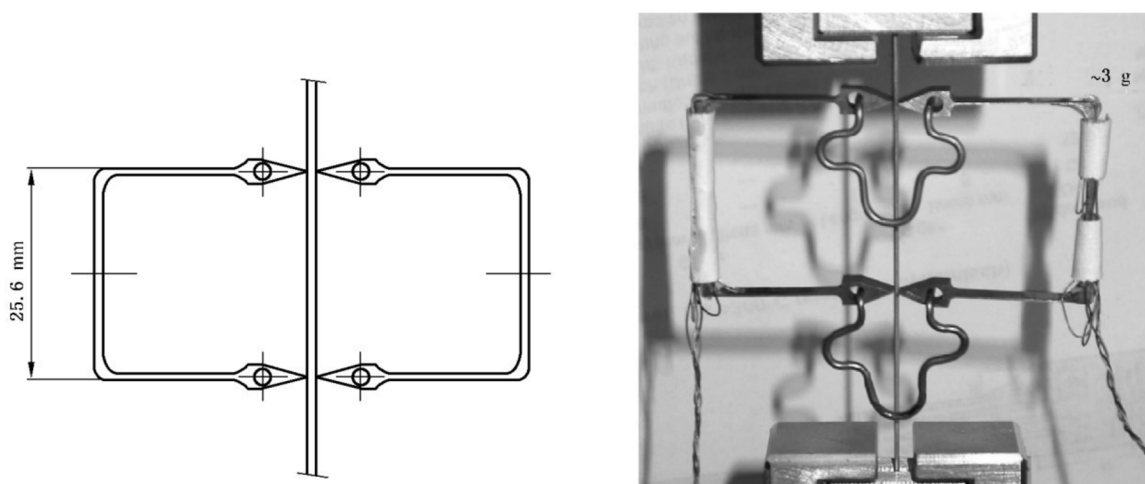
任何类型的引伸计均可使用。若引伸计系统由两个单引伸计组成,则采用两个信号并由软件平均化,或者采集经引伸计自身系统平均后的单一信号。

图 A.1 和图 A.2 为典型的先进轻型引伸计。



引伸计标距约 12 mm(总重约 0.5 g)。两个引伸计连在一起作为一个单引伸计,可以将两个位移记录电学平均。

图 A.1 轻型超小双联式引伸计



引伸计标距约 26 mm(总重约 3 g)。两个单引伸计,信号由软件进行平均。

图 A.2 轻型平均双引伸计

A.2.2 单引伸计

图 A.3 为一种单引伸计。日本曾经用这种引伸计进行了 Cu/Nb-Ti 线室温拉伸的循环比对试验(RRT)并获得了很好的结果。这些结果被用来建立了 IEC 61788-6^[3,4]。

单位为毫米

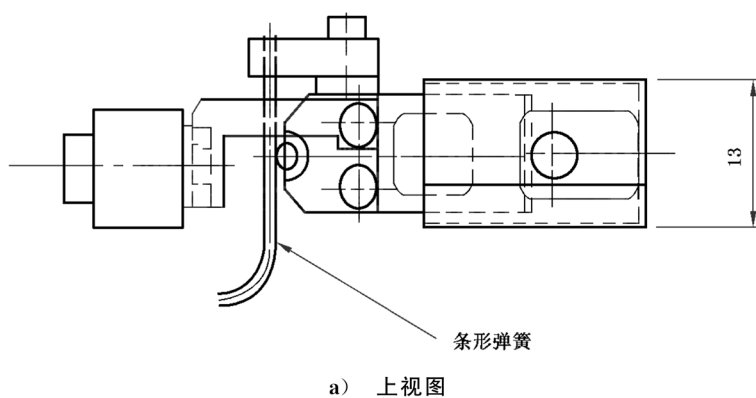


图 A.3 带配重和垂直试样轴的引伸计实例

单位为毫米

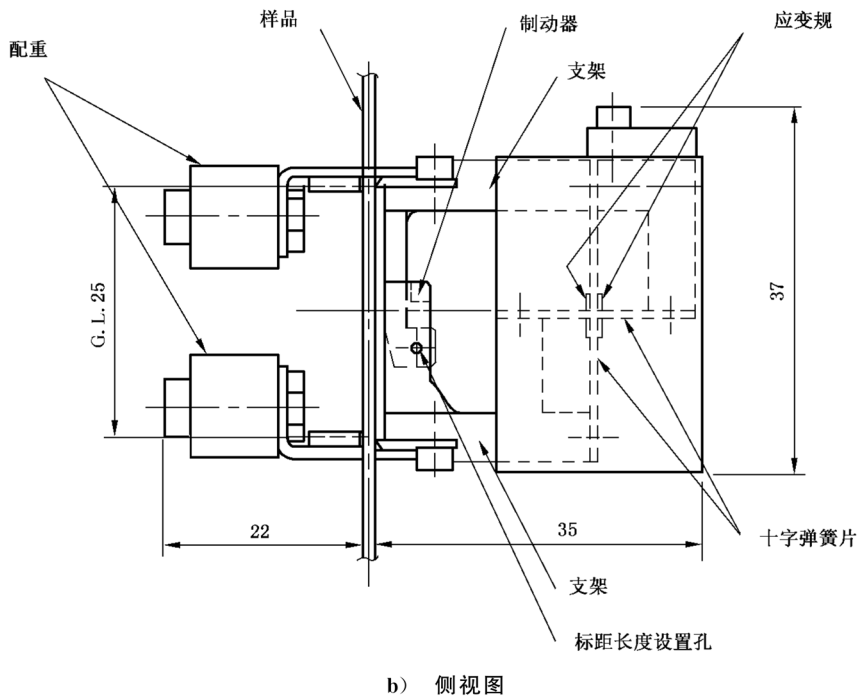


图 A.3 (续)

A.3 光学引伸计

任何基于两个单光束、记录信号并加以平均的光学引伸计均可使用。
或者,也可采用类似于均化双引伸计系统,基于两个激光束或其他两个光学系统的,与样品没有机械接触的系统。

图 A.4 a)为采用 50 Hz 旋转反射器进行试样上条纹扫描的示意图。利用软件对试件加载过程中的位移微小变化进行分析。图 A.4 b)为典型的先进双激光束系统的双镜面布置图。

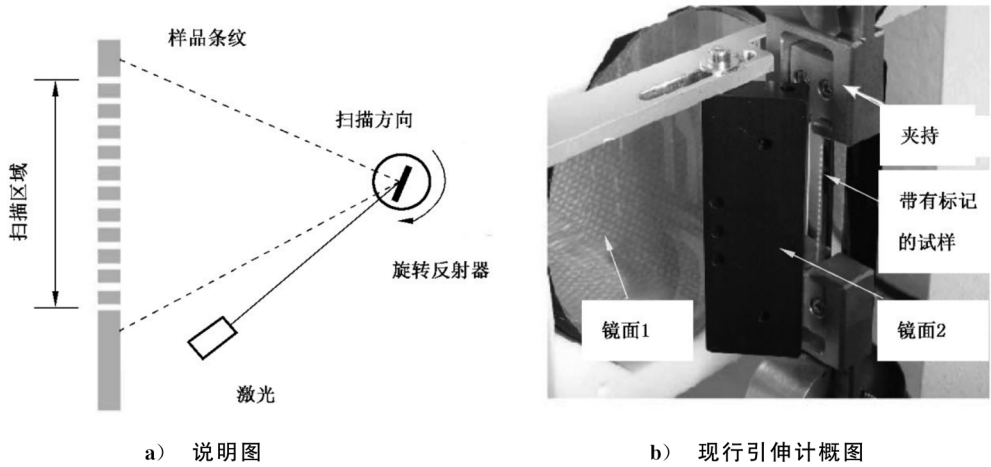
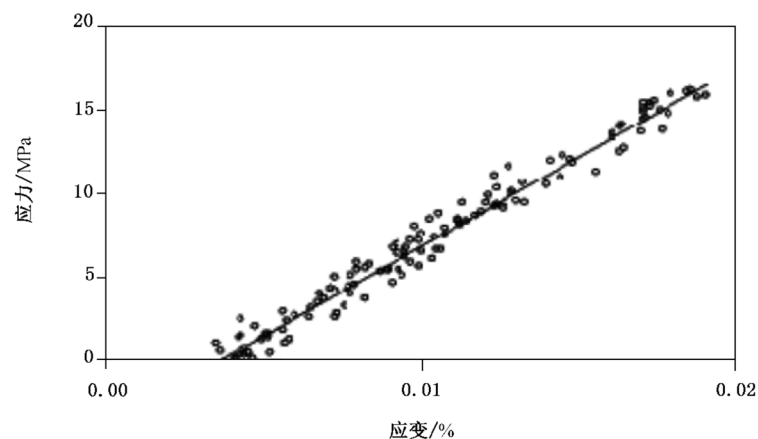


图 A.4 双激光束引伸计



c) 用双激光束引伸计测量直径为 0.81 mm 的反应后的 Nb₃Sn 线材结果

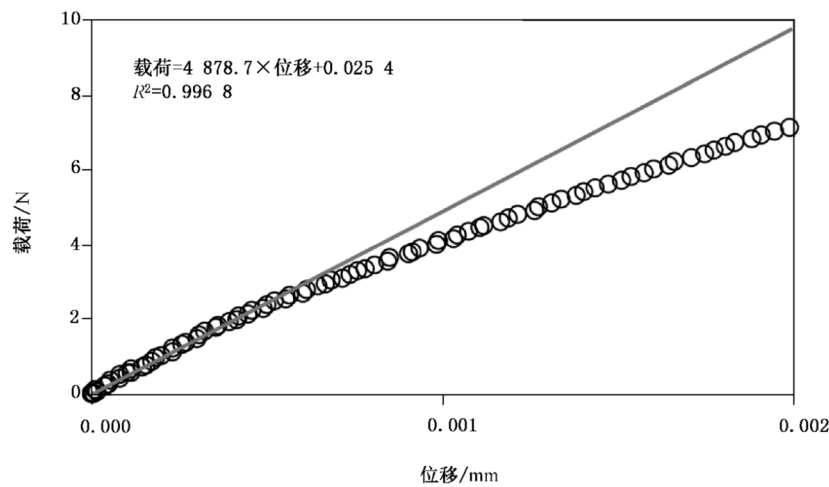
图 A.4 (续)

A.4 高分辨率引伸计要求

从图 A.5 中可推导出对引伸计的要求。原始数据特别是 0~0.01%应变区间内的原始数据宜具备低的相对标准不确定度。该应变区间对应的引伸计总位移为 2.5 μm(25 mm 标距)或者 1.2 μm(12 mm 标距)。事实上,以信噪比 100 倍左右的低噪声采集信号为宜,以确保在所需应变范围内的数据稳定。12 mm 标距的引伸计的校准系数一般为 10 V/mm。因此信号的电压峰峰值 V_{pp} 宜小于 1 mV 才能确保低的相对标准不确定度。采用最先进的信号调节器、屏蔽且扭绞电缆、并且选用 16 位以上的高分辨率数据采集系统,有可能满足需求。图 A.5 显示了测量反应后的 Nb₃Sn 超导线材得到的载荷-位移曲线形式的原始数据。为了获取如图所示的低分散性数据,系统一定要具有高的信噪比,以使曲线能够在 1 μm 位移范围内有好的分辨率^[5,6,8,9]。

为确保用于评估弹性模量的零偏移线具有足够低的相对标准不确定度,采用具备极高信噪比的高分辨率引伸计是首要必备的。

基于两个力学引伸计,两个激光束或两个其他光学系统的双引伸计系统呈 180°对称安装,可以确保弯曲补偿。



该图显示了与位移分辨率相关的必要的低相对标准不确定度。数据来自图 A.1 中测量样品。

图 A.5 测量反应后的 Nb₃Sn 超导线得到的载荷-位移曲线形式的原始数据

A.5 最大弹性拉伸应力 $R_{\text{elasticmax}}$ 和最大弹性应变 $A_{\text{elasticmax}}$

弹性极限的拉伸应力对应于弹性形变向塑性形变的转变点,应采用公式(A.1)计算(图 A.6)。

$$R_{\text{elasticmax}} = F_{\text{elasticmax}} / S_0 \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$R_{\text{elasticmax}}$ ——弹性形变向塑性形变转变点的拉应力,单位为兆帕(MPa);

$F_{\text{elasticmax}}$ ——弹性形变向塑性形变转变点的力,单位为牛顿(N);

弹性形变向塑性形变的转变点的应变,对应应力 $R_{\text{elasticmax}}$ (图 A.6),定义为

$$\Delta A_{\text{total}} = A_{\text{max}} - A_0 \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

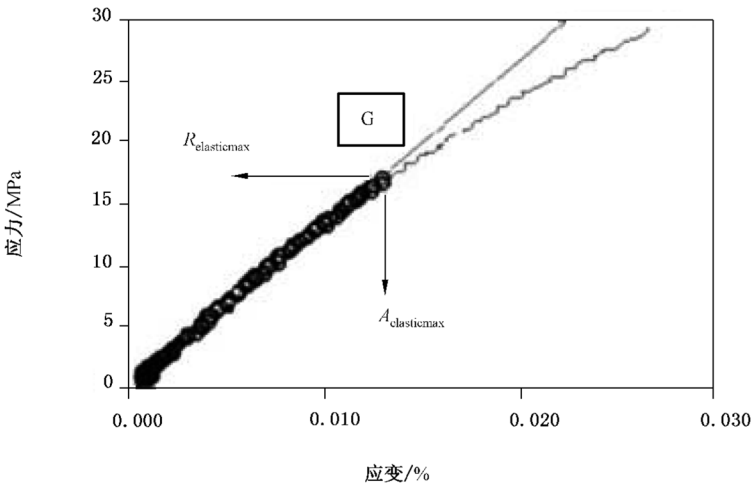
式中:

ΔA_{total} ——相对零点偏移应变的总应变增量,对应于弹性形变向塑性形变转变发生时的应变值;

A_{max} ——应力 $R_{\text{elasticmax}}$ 对应的应变;

A_0 ——零点偏移应变。

$R_{\text{elasticmax}}$ 和 $A_{\text{elasticmax}}$ 值仅作为供参考的信息。



这是弹性形变向塑性形变转变区域(G点)的放大图。点(大圆圈)指记录的初始直线段部分。一次线性回归分析可得出弹性模量 E ($E_0 = 134.7 \text{ GPa}$),采用回归系数来衡量线性度。线性回归分析结果表明,由于数据的离散曲线原点有个纵轴方向的偏移,为 0.188 MPa 。此外,回归系数宜大于 0.99 以确保线性度。应力 $R_{\text{elasticmax}}$ 和应变 $A_{\text{elasticmax}}$ 与弹塑性变形过渡区息息相关。尤其 $R_{\text{elasticmax}}$ 值是判定弹性模量 E_0 的重要数据。较低 $R_{\text{elasticmax}}$ 值(如 $< 5 \text{ MPa}$)可能表示了 E_0 的不确定度很大,其原因可能是线性段很短。由于数据分散,线性段过短会影响被测量 E_0 ,使之不确定度趋高,可能需要重复测量。

图 A.6 反应后的 Nb_3Sn 线材的应力-应变曲线

A.6 单引伸计获得函数拟合应力-应变曲线和 0.2% 规定塑性延伸强度

使用单引伸计的情况下,函数拟合法适用于确定 0.2% 规定塑性延伸强度。通常, $\text{Cu/Nb}_3\text{Sn}$ 线中的铜和青铜组分在从热处理温度冷却到室温的过程中已经发生屈服。因此从严格意义上说,应力-应变

曲线从开始时就发生弯曲了,这将导致难以估测初始弹性模量。此外,由于试样在热处理条件下呈非线性形式,且在放入拉伸试验机过程中会引入预应变,使得应力-应变曲线产生凹凸弯曲,从而对估算本征零应变点时造成困难。函数拟合方法可以有效地排除实验数据中包含的预应变。应力-应变曲线近似为指数函数:

$$F/S_0 = a(A - b)^n \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

F —— 试验中获取的载荷,单位为牛顿(N);

S_0 —— 试样原始横截面积,单位为平方毫米(mm²);

A —— 试验中获取的应变。

a 、 b 和 n 分别是采用非线性最小二乘法拟合获得的参数。为了避免在计算中失位, A 以 % 表示。拟合上限是 0.5%,拟合下限提高至 3 个参数收敛。

函数拟合法测定由铜和青铜组分产生的复合线的 0.2% 规定塑性延伸强度 $R_{p0.2-F}$ 具体如下:考虑通过参数 b 确定的零应变点,将在卸载条件下的直线部分平移至 0.2% 偏移点。该线与拟合后的应力-应变曲线相交得到 C 点,定义为 0.2% 规定塑性延伸强度[图 1 a)]。通过除去参数 b 拟合简化的公式(A.3),相当于忽略预应变,得到一个接近于 $R_{p0.2-F}$ 的更大的塑性延伸强度值。据报道,商用的最小二乘法拟合软件如果采用的容许误差低于 0.1,则相同参数的计算结果几乎都与试验数据相同。然而,数据点和拟合曲线之间的一致性需要确认。

A.7 去除绝缘覆层

应使用合适的方法去除试样表面覆层。通常 Nb₃Sn 导体编织有玻璃或陶瓷纤维,易于剥除或扒除。如果是其他类型绝缘物,应使用有机溶剂或机械方法去除。这两种情况,均应在热处理反应前去除绝缘,且避免对试样表面造成任何伤害。

覆层不是作为结构组分设计的。包含绝缘层的多组分复合材料的测量分析非常复杂。因此,为了保持线的力学行为,本试验方法仅适用于反应后的裸线。

A.8 横截面积确定

如果需要较小的相对标准不确定度,可使用制造规范中给出的数据,通过矫正模具加工的矩形截面的倒圆半径来确定横截面积。对于通过轧制成型或者土耳其头成型的线材,其倒圆半径是不可控的,需要用横截面积的低倍照片来修正。

A.9 将反应后的 Nb₃Sn 线固定在试验机上的两种夹持方式

关于夹持,试样可软钎焊到夹持区域的金属套管上。这些套管宜牢固地夹持到机器拉伸杆。作为选择,夹头可直接夹持线本身,这种情况下,应保证夹持部分的线不被机械损伤。试样被安装到拉伸机的夹头上。任何情况下,试样和拉伸载荷轴都应对齐以避免失配。试样安装过程中,应避免发生弯曲和变形。

根据国际循环比对试验的结果,多种夹持技术均可获得合适的试验结果。因此,建议将本标准提出的夹持技术视为各种可行的技术之一。

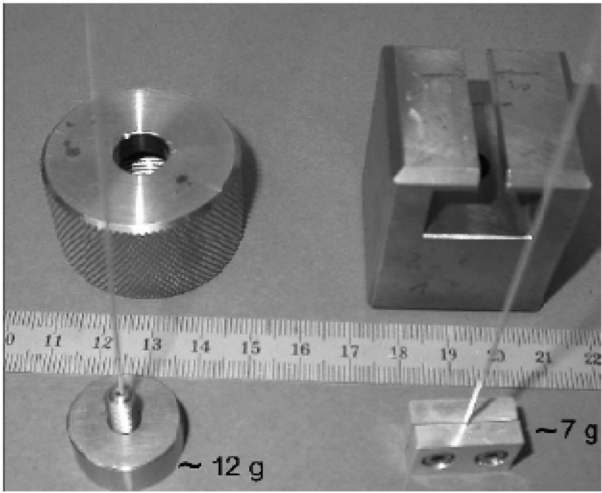
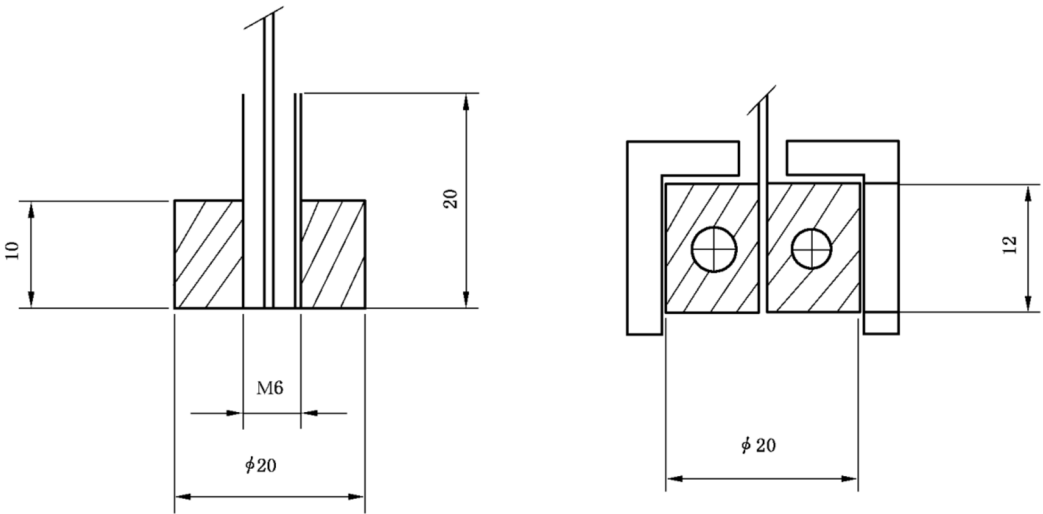


图 A.7 两种可选的夹持方式

左图夹持方式为 Nb₃Sn 线焊接到 M6 的黄铜杆上,黄铜杆固定在提供拉伸运动的铝套管上。套管和 M6 铜杆的总重约 12 g。

右图夹持方式为将 Nb₃Sn 线夹进铝制 V 形槽内。铝块总重约 7 g。铝块插进一个提供拉伸运动的固定装置的小框体内。

单位为毫米



Nb₃Sn 线焊接入 M6 的黄铜杆

用两个 M3 的螺母将 Nb₃Sn 线固定到铝块

该图显示了两种可选的把线固定到试验机上的方式的细节,通过焊接或者夹持。任何情况下,在测量开始之前,不允许在线上引入预载荷。用固定块夹持的线的底部应与试验机无任何接触,以避免任何预载荷。

图 A.8 两种可选的固定线的细节

A.10 抗拉强度(R_m)

断裂时的拉伸强度,用公式(A.4)计算。

$$R_m = F_{max}/S_0 \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

R_m ——断裂时的拉伸应力,单位为兆帕(MPa);

F_{max} ——断裂时的最大力,单位为牛顿(N)。

对于铜-非铜体积比较小的线材,在夹头处会发生过早的断裂,导致测得的抗拉强度和断后伸长率较小。不论是从描述复合材料力学性能的科学的角度的角度,还是从判断试验有效性的角度的角度,抗拉强度和断后伸长率都是很重要的。然而,由于线材的差异性大并且应变的有效区间小,这些值仅供参考。

A.11 断后伸长率(A_f)

测量断后伸长率仅作为参考。如下所示,横梁位移也可用于测量断后伸长率的近似值。用这种方法,应记录断裂时的横梁位置。用公式(A.5)可获得断后伸长率,以百分数形式给出。

$$A_f = 100(L_U - L_g)/L_g \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

A_f ——断后伸长率,%;

L_U ——断裂后夹头间距;

L_g ——初始夹头间距。

A.12 相对标准不确定度

测量本身决定了任何测试结果都是分散的。为了评定测量数据,提出不确定度的概念作为独立判断的合理基础。附录 B 和附录 C 给出了关于被测物理量不确定度的详细资料。

在 11 个研究组进行的国际循环比对试验中,取得了 Nb₃Sn 超导线材拉伸试验的大量经验^[7,9]。尤其是对测量数据的评估,在根据零偏移线和 0.3%~0.4%应变卸载线测定弹性模量方面提供了有价值的信息。通常,从初始加载线获得的弹性模量比从卸载线更加分散。这些数据的全面分析参见参考文献[8],如果把所有结果收集在一起后,显示 E_0 和 E_U 的比值并不为 1。这些变化能够采用简单关系 $1-\Delta < E_0/E_U < 1+\Delta$ 表示,其中 Δ 定义为相对 1 的偏离量。已经证实 Δ 取值 0.3 可以限制初始加载线上的数据分散性和删除不合格数据。

在表 A.1 中,总结了从初始加载线获得的弹性模量以及规定塑性延伸强度等重要量。这些结果的标准不确定度显示:超过 $\Delta=0.3$ 的不合格的数据至少将标准不确定度水平降低 2 倍。

在国际循环比对试验中获取的实验数据分散性与实验室内部和实验室之间的两个因素相关。为了弄清他们各自实验室提交的数据是否属于所有实验数据的同一总体,进行了在文本(参见 ISO/IEC Guide 98-3:2008 中附录 H 的 H.5.2.1)指导下的方差分析(F 检验)。作为一个典型例子,分析了 E_0 的试验数据,结果列于表 A.1。为了在实验室中做出准确比较,有必要选定相同数量的数据,比如 3 组。因此,当数据大于或等于 3 组时,从每个实验室中随机选择 3 组数据。但是,如果某实验室数据少于 3 组,则忽略该数据组。

根据 ISO/IEC Guide 98-3:2008,实验室外偏差(s_a^2)和实验室内偏差(s_b^2)比值记为: $F_{exp} = s_a^2/s_b^2$,并与理论函数 $F_{N-1}^{-1}(\alpha)$ 相比。当假设 $F_{exp} < F_{N-1}^{-1}(\alpha)$ 成立,数据属于同一总体,具有显著性水平 $\alpha\%$ 。对所有数据做 F 检验,这一假设对部分试样不成立,如 E3、E4、H、M 等。另一方面,如果仅将符合 $\Delta=0.3$ 的合格数据用于 F 检验, α 设置为 1%时,这一假设对所有试样都成立。因此,得出结论,F 检验保证了 8.1 提到的利用弹性模量比值进行合格检验的有效性。另外,选用更高的显著性水平 α ,可以使合格条件的判定更加严格。

表 A.1 不同 Nb₃Sn 线材国际循环比对试验的标准不确定度结果

试样	性能(X)	全部数据				合格数据			
		N	<x>	SU	RSU	N'	<x'>	SU	RSU
E2	E ₀ /GPa	35	113.5[GPa]	2.8[GPa]	2.5[%]	22	114[GPa]	1.4[GPa]	0.3[%]
	R _{p0.2-0} /MPa	35	187.1[MPa]	3.0[MPa]	1.6[%]	22	181.7[MPa]	1.3[MPa]	0.7[%]
E3	E ₀ /GPa	33	119.2[GPa]	3.2[GPa]	2.7[%]	21	121[GPa]	1.5[GPa]	1.3[%]
	R _{p0.2-0} /MPa	34	192.1[MPa]	2.3[MPa]	1.2[%]	21	191.8[MPa]	1.6[MPa]	0.8[%]
E4	E ₀ /GPa	36	90.3[GPa]	3.9[GPa]	4.3[%]	14	109.2[GPa]	2.0[GPa]	1.9[%]
	R _{p0.2-0} /MPa	37	113.6[MPa]	2.2[MPa]	1.9[%]	14	111.9[MPa]	3.7[MPa]	3.3[%]
H	E ₀ /GPa	33	88.5[GPa]	4.2[GPa]	4.8[%]	9	109.8[GPa]	2.0[GPa]	1.8[%]
	R _{p0.2-0} /MPa	33	118.8[MPa]	2.3[MPa]	1.9[%]	9	110.3[MPa]	2.9[MPa]	2.6[%]
K	E ₀ /GPa	34	116.2[GPa]	2.8[GPa]	2.4[%]	25	115.6[GPa]	1.1[GPa]	1.0[%]
	R _{p0.2-0} /MPa	33	182[MPa]	2.6[MPa]	1.4[%]	25	179.7[MPa]	2.6[MPa]	1.4[%]
M	E ₀ /GPa	29	88.6[GPa]	5.8[GPa]	6.6[%]	9	120.4[GPa]	3.0[GPa]	2.5[%]
	R _{p0.2-0} /MPa	28	118[MPa]	4.0[MPa]	3.4[%]	9	109.2[MPa]	1.7[MPa]	1.5[%]
<p>N:全部试验试样数量; N':合格试样数量; X:弹性模量或屈服强度; <x>:全部试样平均值; <x'>:合格试样平均值; SU:标准不确定度; RSU:相对标准不确定度。 本表列出了不同 Nb₃Sn 线材在 11 个不同研究实验室进行国际循环比对试验的标准不确定度结果。</p>									

所以,全部试样相对标准不确定度的平均值由公式(A.6)给出。

$$\overline{U_{RSU}} = \frac{\sum_{m=1}^M N'_m U_{RSUm}}{\sum_{m=1}^M N'_m} \dots\dots\dots (A.6)$$

其中,M 表示不同超导线的数量,样品平均数为:

$$\overline{N'} = \frac{\sum_{m=1}^M N'_m}{M} \dots\dots\dots (A.7)$$

按照表 A.1 计算,在通过合格检查后的全部样品平均数 $\overline{N'}=17$ 的弹性模量 E₀ 的相对标准不确定度($\overline{U_{RSU}}$)为 1.5%。采用相同步骤评估 E_U、R_{p0.2-0} 和 R_{p0.2-U} 的 $\overline{U_{RSU}}$,结果见第 9 章。

表 A.2 E_0 方差的 ANOVA(F 检验)结果

试样	全部数据					合格数据				
	J	N	s_a^2/s_b^2	F_{exp}	$F_{N-J}^{J-1}(\alpha)$	J'	N'	s_a^2/s_b^2	F_{exp}	$F_{N'-J'}^{J'-1}(\alpha)$
E2	8	24	318/195	1.6	4.05	8	24	318/195	1.6	4.05
E3	9	27	803/163	4.9	3.73	8	24	500/182	2.7	4.05
E4	9	27	1 189/165	7.2	3.73	7	21	613/205	2.9	4.46
H	9	27	1 388/180	7.6	3.73	6	18	841/238	3.5	5.06
K	9	27	205/96	2.1	3.73	9	27	205/96	2.1	3.73
M	8	24	3 180/191	16.5	4.05	3	9	912/158	5.7	10.9
假定验证的显著水平为 1%，设置每个实验室数据含 3 个值($n=3$)，因此， $N=nJ$ 。表中， J ：实验室数量， N ：全部试样数量， J' ：合格实验室数量， N' ：合格试样数量。										

A.13 弹性模量 E_0 的确定

确定弹性模量 E_0 需要一个数据采集系统。在应力-应变数据记录的零偏移区间，该系统具备较小的相对不确定度。为了确保无偏数据，记录的应力-应变数据宜依据如下推荐步骤进行评估。

采用应力-应变原始数据可确定 0 MPa~50 MPa 应力之间的一次线性回归线和回归系数。此处控制条件是，回归系数宜大于 0.99。从 50 MPa 开始逐步降低拟合区间的应力上限，直至线性斜率满足上述条件。线性斜率定义为弹性模量 E_0 。线性斜率与横坐标相交于新的应力-应变图原点，通过 0.2% 平移评估 $R_{p0.2-0}$ （见图 1）。

A.14 测试设备可靠性评估

由拉力试验装置、载荷传感器和使用的引伸计系统组成的试验设备，其可靠性可以用尺寸相近、弹性特性已知的线材进行测试。直径约 1 mm 的铝焊丝和工业纯钛焊丝已被证实是最佳测试对比材料，其弹性模量介于 70 GPa 和 100 GPa 之间。这些焊丝易于采购。特别建议实验室定期测量其弹性性能来确认拉伸设备的可靠性。对于这些测试，焊丝的测试过程应与热处理后超导线的测试过程相同。这些线材能够在最大 100 MPa 的弹性区域内进行加载和卸载，而不影响其弹性性能。

附录 B

(资料性附录)

不确定度考虑

B.1 概述

1995年,包括国际电工技术委员会(IEC)在内的多个国际标准组织决定在他们的标准中统一规范使用统计术语,将“不确定度”用于所有定量(与数值有关)的统计表示,取消用“精密度”和“准确度”的定量表示。“精密度”和“准确度”仍然可以定性使用。统计术语和不确定度评定方法的标准参见参考文献[10]。

IEC 现有标准和未来标准的制修订中是否采用不确定度表示方法,由 IEC 各技术委员会(TC)决定。这项更改工作推行起来并不容易,尤其对那些不熟悉统计学以及不确定度术语的用户来说,这种更改可能会带来困惑。2006年6月,超导技术委员会(TC 90)在京都召开的会议上决定在标准的制修订中采用不确定表示方法。

将“精密度”和“准确度”转换成“不确定度”要求对数值的来源有所了解。扩展不确定度的包含因子可能是1,2,3或者其他数字。厂商说明书给出的数据一般可视为均匀分布,会导致一个 $1/\sqrt{3}$ 的转化系数。在将原数值转换成相应的标准不确定度时,应选用适当的包含因子。这里对转换过程进行详细解释,旨在告知用户在这个过程中相关的数值之间是如何转换的,并非要求用户都照此处理。转换成不确定度术语的过程不影响用户评定其测量的不确定度是否符合本标准。

基于召集人的工程判断和误差传递分析,TC 90 测量标准中给出的规范是为了限制任何影响测量的量的不确定度。如有可能,标准对某些量的影响做简单限制,因此不要求用户评定这些量的不确定度。标准的总不确定度由实验室间比对来确认。

B.2 定义

统计学定义出自参考文献[10]、[11]、[12]。要注意的是,并非本标准提到的所有术语都在参考文献[10]中有明确定义。例如,参考文献[10]中使用了术语“相对标准不确定度”和“相对合成标准不确定度”(ISO/IEC Guide 98-3:2008的5.1.6和附录J)但并没有正式地定义(参见参考文献[12])。

B.3 不确定度概念的考虑

统计学评定过去频繁使用的变化系数(COV)是标准偏差和均值的比(变化系数 COV 通常称为相对标准偏差)。这样的评估已经用于测量精密度的评定,并给出重复试验的紧密度。标准不确定度(SU)与变化系数 COV 相比,更多地取决于重复试验的数量,较少依赖于平均值,因此,在某种程度上给出更真实的数据分散和试验评判图像。下面的例子(见表 B.1~表 B.5)给出一组从两个标称一致的引伸计使用相同信号调节器和数据采集系统进行的电子漂移和蠕变电压的测量结果。从 32 000 个单元的电子表格中随机抽取 $n=10$ 组数据。这里,1号引伸计 E_1 在零偏移位置时,2号引伸计 E_2 偏移 1 mm。输出信号单位为伏(V)。两个引伸计输出信号的标准不确定度和变化系数(COV)计算过程见表 B.2~表 B.5,及公式(B.1)~公式(B.4)。

表 B.1 两个标称一致引伸计的输出信号

输出信号/V	
E_1	E_2
0,001 220 70	2,334 594 73
0,000 610 35	2,334 289 55
0,001 525 88	2,334 289 55
0,001 220 70	2,334 594 73
0,001 525 88	2,334 594 73
0,001 220 70	2,333 984 38
0,001 525 88	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 594 73
0,001 220 70	2,334 594 73

表 B.2 两个输出信号的平均值

均值 \overline{X} /V	
E_1	E_2
0,001 190 19	2,334 411 62

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \text{ [V]} \dots\dots\dots (\text{ B.1 })$$

表 B.3 两个输出信号的实验标准偏差

实验标准偏差 s /V	
E_1	E_2
0,000 303 48	0,000 213 381

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})^2} \text{ [V]} \dots\dots\dots (\text{ B.2 })$$

表 B.4 两个输出信号的标准不确定度

标准不确定度 u /V	
E_1	E_2
0,000 095 97	0,000 067 48

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \text{ [V]} \dots\dots\dots (B.3)$$

表 B.5 两个输出信号的变化系数

变化系数 COV/%	
E_1	E_2
25.498 2	0.009 1

$$\text{COV} = \frac{s}{X} \dots\dots\dots (B.4)$$

两个引伸计偏差的标准不确定度非常相近,而两组数据的变化系数 COV 相差将近 2 800 倍。这显示了使用标准不确定度的优势:不确定度不依赖于平均值。

B.4 TC 90 标准不确定度评定范例

测量的观测值往往不能精确地与被测物理量的真实值相符。观测值被当作是对真实值的一种估测。测量的不确定度是测量误差的组成部分并且是任何测量都存在的固有性质。因此,结果的不确定度表示的是对测量程序逐步认知的计量学量。所有物理测量的结果都包含两个部分:估算值和不确定度。GUM 是测量过程的一个简明的、标准化的指南文件。用户可以尝试用一个最佳估算值加上不确定度来表述真实值。如 A 类不确定度评定(在同一实验条件下反复测量,呈高斯分布)和 B 类不确定度评定(利用以往的实验结果,文献的数据,厂商说明等等,呈均匀分布)。

下面举例说明用 GUM 进行不确定度分析的过程:

- a) 首先,用户应推导出一个数学测量模型,即将被测量表示成所有输入量的函数。举个简单例子,拉力 F_{LC} 实验中载荷传感器测量拉力的不确定度:

F_{LC} 拉力(作为被测物理量) = W (预期的标重) + d_w (厂商的数据) + d_R (反复测量标重/天) + d_{Re} (不同日期测量的可再现性)

这里,输入量有:不同天平称量的标重(A 类),厂商的数据(B 类),用数字电子系统反复测量的结果(B 类),不同日期测量最终数值的可再现性(B 类)。

- b) 用户应给每个输入值指定一个分布方式(如 A 类测量用高斯分布,B 类测量用均匀分布)。
c) A 类测量标准不确定度评定见公式(B.5):

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

s —— 实验标准偏差;
 n —— 为测量数据点总数。

- d) B 类测量标准不确定度评定见公式(B.6):

$$u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot d_w^2 + \dots} \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

d_w —— 均匀分布数值的范围。

- e) 用公式(B.7)计算各种标准不确定度的合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \dots\dots\dots (B.7)$$

在这种情况下,假定各输入量之间没有关联。如果说方程包含乘积项或商项,合成标准不确定度则使用偏导数评定,由于灵敏系数的存在,其间关系就变得纷繁复杂^[13,14]。

- f) 可作为选择——涉及的被测量的合成标准不确定度的评定可以乘以一个包含因子(如,1 对应于 68%;2 对应于 95%;3 对应于 99%),以提高被测量落于期望区间的概率。
- g) 报告结果表示成被测量的估计值加减扩展不确定度且附上测量单位。至少,还得说明计算的扩展不确定度使用的包含因子和估算结果的覆盖率。

为方便计算和标准化程序,使用合适的经认证的商业软件是降低常规工作量的直接方法^[15,16]。尤其,当使用这样一类软件工具时,指定的偏导数可以很容易地获得。更多关于测量不确定度的文献参见 [12]、[17]、[18]。

附录 C
(资料性附录)
力学测试相关范例

C.1 概述

本附录中的范例阐述了不确定度评定技术。引入这些例子并非意味着用户为了遵循本标准应完成类似的不确定度分析,然而,用户需要对每个独立影响量(负载、位移、线径和标距)的不确定度进行估算,以评定是否满足标准中规定的不确定度限制。

这两个例子并不完全详尽。它们没有包含所有可能的误差因素,例如摩擦、线的弯曲/矫直、绝缘层去除、夹头的错位和应变速率。这些额外因素有的可以忽略,有的不可以忽略。

C.2 弹性模量不确定度

图 C.1 给出了 Nb₃Sn 线(直径 0.783 mm)的应力-应变原始数据。这些测量是在 2006 年国际循环比对试验时进行的。图 C.1 a)表示线材加载直至断裂,图 C.1 b)表示初始加载到 16 MPa 的数据点和这些数据的拟合线。该趋势线计算的斜率是 132 069 MPa(由于横坐标单位是百分比斜率放大了 100 倍),回归系数为 0.989 9,如图 1 b)所示。

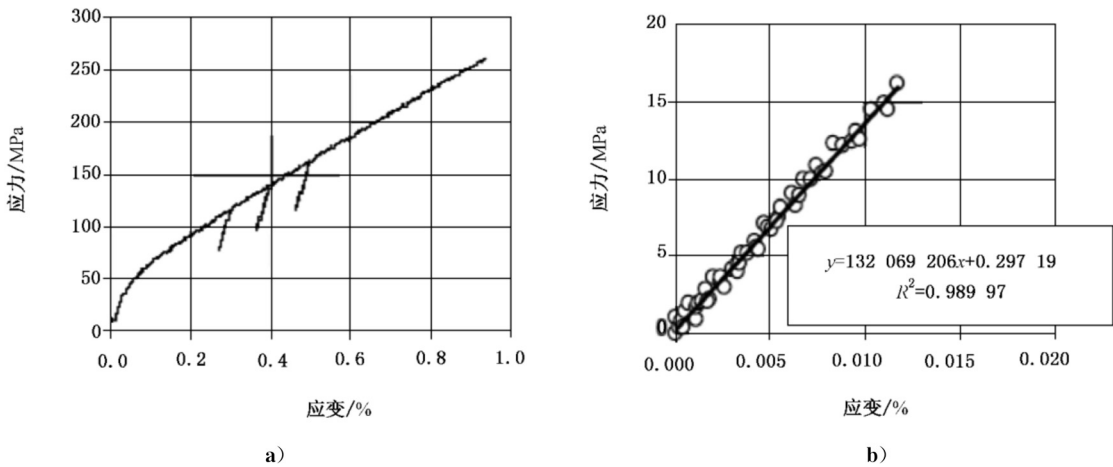


图 a)表示直径为 0.783 mm 的超导线的应力-应变测量曲线。图 b)表示初始部分曲线以及为确定弹性模量所做的回归分析。将百分应变转换成应变直线斜率乘以 100,弹性模量的单位为 MPa。

图 C.1 应力-应变测量曲线

线材弹性模量的标准不确定度的估算可按照 ([C.1]) ([C.2]) ([C.3]) ([C.4]) ([C.5]) ([C.6]) ([C.7]) ([C.8]) ([C.9]) ([C.10]) ([C.11]) ([C.12]) ([C.13]) ([C.14]) ([C.15]) ([C.16]) ([C.17]) ([C.18]) ([C.19]) ([C.20]) ([C.21]) ([C.22]) ([C.23]) ([C.24]) ([C.25]) ([C.26]) ([C.27]) ([C.28]) ([C.29]) ([C.30]) ([C.31]) ([C.32]) ([C.33]) ([C.34]) ([C.35]) ([C.36]) ([C.37]) ([C.38]) ([C.39]) ([C.40]) ([C.41]) ([C.42]) ([C.43]) ([C.44]) ([C.45]) ([C.46]) ([C.47]) ([C.48]) ([C.49]) ([C.50]) ([C.51]) ([C.52]) ([C.53]) ([C.54]) ([C.55]) ([C.56]) ([C.57]) ([C.58]) ([C.59]) ([C.60]) ([C.61]) ([C.62]) ([C.63]) ([C.64]) ([C.65]) ([C.66]) ([C.67]) ([C.68]) ([C.69]) ([C.70]) ([C.71]) ([C.72]) ([C.73]) ([C.74]) ([C.75]) ([C.76]) ([C.77]) ([C.78]) ([C.79]) ([C.80]) ([C.81]) ([C.82]) ([C.83]) ([C.84]) ([C.85]) ([C.86]) ([C.87]) ([C.88]) ([C.89]) ([C.90]) ([C.91]) ([C.92]) ([C.93]) ([C.94]) ([C.95]) ([C.96]) ([C.97]) ([C.98]) ([C.99]) ([C.100]) ([C.101]) ([C.102]) ([C.103]) ([C.104]) ([C.105]) ([C.106]) ([C.107]) ([C.108]) ([C.109]) ([C.110]) ([C.111]) ([C.112]) ([C.113]) ([C.114]) ([C.115]) ([C.116]) ([C.117]) ([C.118]) ([C.119]) ([C.120]) ([C.121]) ([C.122]) ([C.123]) ([C.124]) ([C.125]) ([C.126]) ([C.127]) ([C.128]) ([C.129]) ([C.130]) ([C.131]) ([C.132]) ([C.133]) ([C.134]) ([C.135]) ([C.136]) ([C.137]) ([C.138]) ([C.139]) ([C.140]) ([C.141]) ([C.142]) ([C.143]) ([C.144]) ([C.145]) ([C.146]) ([C.147]) ([C.148]) ([C.149]) ([C.150]) ([C.151]) ([C.152]) ([C.153]) ([C.154]) ([C.155]) ([C.156]) ([C.157]) ([C.158]) ([C.159]) ([C.160]) ([C.161]) ([C.162]) ([C.163]) ([C.164]) ([C.165]) ([C.166]) ([C.167]) ([C.168]) ([C.169]) ([C.170]) ([C.171]) ([C.172]) ([C.173]) ([C.174]) ([C.175]) ([C.176]) ([C.177]) ([C.178]) ([C.179]) ([C.180]) ([C.181]) ([C.182]) ([C.183]) ([C.184]) ([C.185]) ([C.186]) ([C.187]) ([C.188]) ([C.189]) ([C.190]) ([C.191]) ([C.192]) ([C.193]) ([C.194]) ([C.195]) ([C.196]) ([C.197]) ([C.198]) ([C.199]) ([C.200]) ([C.201]) ([C.202]) ([C.203]) ([C.204]) ([C.205]) ([C.206]) ([C.207]) ([C.208]) ([C.209]) ([C.210]) ([C.211]) ([C.212]) ([C.213]) ([C.214]) ([C.215]) ([C.216]) ([C.217]) ([C.218]) ([C.219]) ([C.220]) ([C.221]) ([C.222]) ([C.223]) ([C.224]) ([C.225]) ([C.226]) ([C.227]) ([C.228]) ([C.229]) ([C.230]) ([C.231]) ([C.232]) ([C.233]) ([C.234]) ([C.235]) ([C.236]) ([C.237]) ([C.238]) ([C.239]) ([C.240]) ([C.241]) ([C.242]) ([C.243]) ([C.244]) ([C.245]) ([C.246]) ([C.247]) ([C.248]) ([C.249]) ([C.250]) ([C.251]) ([C.252]) ([C.253]) ([C.254]) ([C.255]) ([C.256]) ([C.257]) ([C.258]) ([C.259]) ([C.260]) ([C.261]) ([C.262]) ([C.263]) ([C.264]) ([C.265]) ([C.266]) ([C.267]) ([C.268]) ([C.269]) ([C.270]) ([C.271]) ([C.272]) ([C.273]) ([C.274]) ([C.275]) ([C.276]) ([C.277]) ([C.278]) ([C.279]) ([C.280]) ([C.281]) ([C.282]) ([C.283]) ([C.284]) ([C.285]) ([C.286]) ([C.287]) ([C.288]) ([C.289]) ([C.290]) ([C.291]) ([C.292]) ([C.293]) ([C.294]) ([C.295]) ([C.296]) ([C.297]) ([C.298]) ([C.299]) ([C.300]) ([C.301]) ([C.302]) ([C.303]) ([C.304]) ([C.305]) ([C.306]) ([C.307]) ([C.308]) ([C.309]) ([C.310]) ([C.311]) ([C.312]) ([C.313]) ([C.314]) ([C.315]) ([C.316]) ([C.317]) ([C.318]) ([C.319]) ([C.320]) ([C.321]) ([C.322]) ([C.323]) ([C.324]) ([C.325]) ([C.326]) ([C.327]) ([C.328]) ([C.329]) ([C.330]) ([C.331]) ([C.332]) ([C.333]) ([C.334]) ([C.335]) ([C.336]) ([C.337]) ([C.338]) ([C.339]) ([C.340]) ([C.341]) ([C.342]) ([C.343]) ([C.344]) ([C.345]) ([C.346]) ([C.347]) ([C.348]) ([C.349]) ([C.350]) ([C.351]) ([C.352]) ([C.353]) ([C.354]) ([C.355]) ([C.356]) ([C.357]) ([C.358]) ([C.359]) ([C.360]) ([C.361]) ([C.362]) ([C.363]) ([C.364]) ([C.365]) ([C.366]) ([C.367]) ([C.368]) ([C.369]) ([C.370]) ([C.371]) ([C.372]) ([C.373]) ([C.374]) ([C.375]) ([C.376]) ([C.377]) ([C.378]) ([C.379]) ([C.380]) ([C.381]) ([C.382]) ([C.383]) ([C.384]) ([C.385]) ([C.386]) ([C.387]) ([C.388]) ([C.389]) ([C.390]) ([C.391]) ([C.392]) ([C.393]) ([C.394]) ([C.395]) ([C.396]) ([C.397]) ([C.398]) ([C.399]) ([C.400]) ([C.401]) ([C.402]) ([C.403]) ([C.404]) ([C.405]) ([C.406]) ([C.407]) ([C.408]) ([C.409]) ([C.410]) ([C.411]) ([C.412]) ([C.413]) ([C.414]) ([C.415]) ([C.416]) ([C.417]) ([C.418]) ([C.419]) ([C.420]) ([C.421]) ([C.422]) ([C.423]) ([C.424]) ([C.425]) ([C.426]) ([C.427]) ([C.428]) ([C.429]) ([C.430]) ([C.431]) ([C.432]) ([C.433]) ([C.434]) ([C.435]) ([C.436]) ([C.437]) ([C.438]) ([C.439]) ([C.440]) ([C.441]) ([C.442]) ([C.443]) ([C.444]) ([C.445]) ([C.446]) ([C.447]) ([C.448]) ([C.449]) ([C.450]) ([C.451]) ([C.452]) ([C.453]) ([C.454]) ([C.455]) ([C.456]) ([C.457]) ([C.458]) ([C.459]) ([C.460]) ([C.461]) ([C.462]) ([C.463]) ([C.464]) ([C.465]) ([C.466]) ([C.467]) ([C.468]) ([C.469]) ([C.470]) ([C.471]) ([C.472]) ([C.473]) ([C.474]) ([C.475]) ([C.476]) ([C.477]) ([C.478]) ([C.479]) ([C.480]) ([C.481]) ([C.482]) ([C.483]) ([C.484]) ([C.485]) ([C.486]) ([C.487]) ([C.488]) ([C.489]) ([C.490]) ([C.491]) ([C.492]) ([C.493]) ([C.494]) ([C.495]) ([C.496]) ([C.497]) ([C.498]) ([C.499]) ([C.500]) ([C.501]) ([C.502]) ([C.503]) ([C.504]) ([C.505]) ([C.506]) ([C.507]) ([C.508]) ([C.509]) ([C.510]) ([C.511]) ([C.512]) ([C.513]) ([C.514]) ([C.515]) ([C.516]) ([C.517]) ([C.518]) ([C.519]) ([C.520]) ([C.521]) ([C.522]) ([C.523]) ([C.524]) ([C.525]) ([C.526]) ([C.527]) ([C.528]) ([C.529]) ([C.530]) ([C.531]) ([C.532]) ([C.533]) ([C.534]) ([C.535]) ([C.536]) ([C.537]) ([C.538]) ([C.539]) ([C.540]) ([C.541]) ([C.542]) ([C.543]) ([C.544]) ([C.545]) ([C.546]) ([C.547]) ([C.548]) ([C.549]) ([C.550]) ([C.551]) ([C.552]) ([C.553]) ([C.554]) ([C.555]) ([C.556]) ([C.557]) ([C.558]) ([C.559]) ([C.560]) ([C.561]) ([C.562]) ([C.563]) ([C.564]) ([C.565]) ([C.566]) ([C.567]) ([C.568]) ([C.569]) ([C.570]) ([C.571]) ([C.572]) ([C.573]) ([C.574]) ([C.575]) ([C.576]) ([C.577]) ([C.578]) ([C.579]) ([C.580]) ([C.581]) ([C.582]) ([C.583]) ([C.584]) ([C.585]) ([C.586]) ([C.587]) ([C.588]) ([C.589]) ([C.590]) ([C.591]) ([C.592]) ([C.593]) ([C.594]) ([C.595]) ([C.596]) ([C.597]) ([C.598]) ([C.599]) ([C.600]) ([C.601]) ([C.602]) ([C.603]) ([C.604]) ([C.605]) ([C.606]) ([C.607]) ([C.608]) ([C.609]) ([C.610]) ([C.611]) ([C.612]) ([C.613]) ([C.614]) ([C.615]) ([C.616]) ([C.617]) ([C.618]) ([C.619]) ([C.620]) ([C.621]) ([C.622]) ([C.623]) ([C.624]) ([C.625]) ([C.626]) ([C.627]) ([C.628]) ([C.629]) ([C.630]) ([C.631]) ([C.632]) ([C.633]) ([C.634]) ([C.635]) ([C.636]) ([C.637]) ([C.638]) ([C.639]) ([C.640]) ([C.641]) ([C.642]) ([C.643]) ([C.644]) ([C.645]) ([C.646]) ([C.647]) ([C.648]) ([C.649]) ([C.650]) ([C.651]) ([C.652]) ([C.653]) ([C.654]) ([C.655]) ([C.656]) ([C.657]) ([C.658]) ([C.659]) ([C.660]) ([C.661]) ([C.662]) ([C.663]) ([C.664]) ([C.665]) ([C.666]) ([C.667]) ([C.668]) ([C.669]) ([C.670]) ([C.671]) ([C.672]) ([C.673]) ([C.674]) ([C.675]) ([C.676]) ([C.677]) ([C.678]) ([C.679]) ([C.680]) ([C.681]) ([C.682]) ([C.683]) ([C.684]) ([C.685]) ([C.686]) ([C.687]) ([C.688]) ([C.689]) ([C.690]) ([C.691]) ([C.692]) ([C.693]) ([C.694]) ([C.695]) ([C.696]) ([C.697]) ([C.698]) ([C.699]) ([C.700]) ([C.701]) ([C.702]) ([C.703]) ([C.704]) ([C.705]) ([C.706]) ([C.707]) ([C.708]) ([C.709]) ([C.710]) ([C.711]) ([C.712]) ([C.713]) ([C.714]) ([C.715]) ([C.716]) ([C.717]) ([C.718]) ([C.719]) ([C.720]) ([C.721]) ([C.722]) ([C.723]) ([C.724]) ([C.725]) ([C.726]) ([C.727]) ([C.728]) ([C.729]) ([C.730]) ([C.731]) ([C.732]) ([C.733]) ([C.734]) ([C.735]) ([C.736]) ([C.737]) ([C.738]) ([C.739]) ([C.740]) ([C.741]) ([C.742]) ([C.743]) ([C.744]) ([C.745]) ([C.746]) ([C.747]) ([C.748]) ([C.749]) ([C.750]) ([C.751]) ([C.752]) ([C.753]) ([C.754]) ([C.755]) ([C.756]) ([C.757]) ([C.758]) ([C.759]) ([C.760]) ([C.761]) ([C.762]) ([C.763]) ([C.764]) ([C.765]) ([C.766]) ([C.767]) ([C.768]) ([C.769]) ([C.770]) ([C.771]) ([C.772]) ([C.773]) ([C.774]) ([C.775]) ([C.776]) ([C.777]) ([C.778]) ([C.779]) ([C.780]) ([C.781]) ([C.782]) ([C.783]) ([C.784]) ([C.785]) ([C.786]) ([C.787]) ([C.788]) ([C.789]) ([C.790]) ([C.791]) ([C.792]) ([C.793]) ([C.794]) ([C.795]) ([C.796]) ([C.797]) ([C.798]) ([C.799]) ([C.800]) ([C.801]) ([C.802]) ([C.803]) ([C.804]) ([C.805]) ([C.806]) ([C.807]) ([C.808]) ([C.809]) ([C.810]) ([C.811]) ([C.812]) ([C.813]) ([C.814]) ([C.815]) ([C.816]) ([C.817]) ([C.818]) ([C.819]) ([C.820]) ([C.821]) ([C.822]) ([C.823]) ([C.824]) ([C.825]) ([C.826]) ([C.827]) ([C.828]) ([C.829]) ([C.830]) ([C.831]) ([C.832]) ([C.833]) ([C.834]) ([C.835]) ([C.836]) ([C.837]) ([C.838]) ([C.839]) ([C.840]) ([C.841]) ([C.842]) ([C.843]) ([C.844]) ([C.845]) ([C.846]) ([C.847]) ([C.848]) ([C.849]) ([C.850]) ([C.851]) ([C.852]) ([C.853]) ([C.854]) ([C.855]) ([C.856]) ([C.857]) ([C.858]) ([C.859]) ([C.860]) ([C.861]) ([C.862]) ([C.863]) ([C.864]) ([C.865]) ([C.866]) ([C.867]) ([C.868]) ([C.869]) ([C.870]) ([C.871]) ([C.872]) ([C.873]) ([C.874]) ([C.875]) ([C.876]) ([C.877]) ([C.878]) ([C.879]) ([C.880]) ([C.881]) ([C.882]) ([C.883]) ([C.884]) ([C.885]) ([C.886]) ([C.887]) ([C.888]) ([C.889]) ([C.890]) ([C.891]) ([C.892]) ([C.893]) ([C.894]) ([C.895]) ([C.896]) ([C.897]) ([C.898]) ([C.899]) ([C.900]) ([C.901]) ([C.902]) ([C.903]) ([C.904]) ([C.905]) ([C.906]) ([C.907]) ([C.908]) ([C.909]) ([C.910]) ([C.911]) ([C.912]) ([C.913]) ([C.914]) ([C.915]) ([C.916]) ([C.917]) ([C.918]) ([C.919]) ([C.920]) ([C.921]) ([C.922]) ([C.923]) ([C.924]) ([C.925]) ([C.926]) ([C.927]) ([C.928]) ([C.929]) ([C.930]) ([C.931]) ([C.932]) ([C.933]) ([C.934]) ([C.935]) ([C.936]) ([C.937]) ([C.938]) ([C.939]) ([C.940]) ([C.941]) ([C.942]) ([C.943]) ([C.944]) ([C.945]) ([C.946]) ([C.947]) ([C.948]) ([C.949]) ([C.950]) ([C.951]) ([C.952]) ([C.953]) ([C.954]) ([C.955]) ([C.956]) ([C.957]) ([C.958]) ([C.959]) ([C.960]) ([C.961]) ([C.962]) ([C.963]) ([C.964]) ([C.965]) ([C.966]) ([C.967]) ([C.968]) ([C.969]) ([C.970]) ([C.971]) ([C.972]) ([C.973]) ([C.974]) ([C.975]) ([C.976]) ([C.977]) ([C.978]) ([C.979]) ([C.980]) ([C.981]) ([C.982]) ([C.983]) ([C.984]) ([C.985]) ([C.986]) ([C.987]) ([C.988]) ([C.989]) ([C.990]) ([C.991]) ([C.992]) ([C.993]) ([C.994]) ([C.995]) ([C.996]) ([C.997]) ([C.998]) ([C.999]) ([C.1000]) ([C.1001]) ([C.1002]) ([C.1003]) ([C.1004]) ([C.1005]) ([C.1006]) ([C.1007]) ([C.1008]) ([C.1009]) ([C.1010]) ([C.1011]) ([C.1012]) ([C.1013]) ([C.1014]) ([C.1015]) ([C.1016]) ([C.1017]) ([C.1018]) ([C.1019]) ([C.1020]) ([C.1021]) ([C.1022]) ([C.1023]) ([C.1024]) ([C.1025]) ([C.1026]) ([C.1027]) ([C.1028]) ([C.1029]) ([C.1030]) ([C.1031]) ([C.1032]) ([C.1033]) ([C.1034]) ([C.1035]) ([C.1036]) ([C.1037]) ([C.1038]) ([C.1039]) ([C.1040]) ([C.1041]) ([C.1042]) ([C.1043]) ([C.1044]) ([C.1045]) ([C.1046]) ([C.1047]) ([C.1048]) ([C.1049]) ([C.1050]) ([C.1051]) ([C.1052]) ([C.1053]) ([C.1054]) ([C.1055]) ([C.1056]) ([C.1057]) ([C.1058]) ([C.1059]) ([C.1060]) ([C.1061]) ([C.1062]) ([C.1063]) ([C.1064]) ([C.1065]) ([C.1066]) ([C.1067]) ([C.1068]) ([C.1069]) ([C.1070]) ([C.1071]) ([C.1072]) ([C.1073]) ([C.1074]) ([C.1075]) ([C.1076]) ([C.1077]) ([C.1078]) ([C.1079]) ([C.1080]) ([C.1081]) ([C.1082]) ([C.1083]) ([C.1084]) ([C.1085]) ([C.1086]) ([C.1087]) ([C.1088]) ([C.1089]) ([C.1090]) ([C.1091]) ([C.1092]) ([C.1093]) ([C.1094]) ([C.1095]) ([C.1096]) ([C.1097]) ([C.1098]) ([C.1099]) ([C.1100]) ([C.1101]) ([C.1102]) ([C.1103]) ([C.1104]) ([C.1105]) ([C.1106]) ([C.1107]) ([C.1108]) ([C.1109]) ([C.1110]) ([C.1111]) ([C.1112]) ([C.1113]) ([C.1114]) ([C.1115]) ([C.1116]) ([C.1117]) ([C.1118]) ([C.1119]) ([C.1120]) ([C.1121]) ([C.1122]) ([C.1123]) ([C.1124]) ([C.1125]) ([C.1126]) ([C.1127]) ([C.1128]) ([C.1129]) ([C.1130]) ([C.1131]) ([C.1132]) ([C.1133]) ([C.1134]) ([C.1135]) ([C.1136]) ([C.1137]) ([C.1138]) ([C.1139]) ([C.1140]) ([C.1141]) ([C.1142]) ([C.1143]) ([C.1144]) ([C.1145]) ([C.1146]) ([C.1147]) ([C.1148]) ([C.1149]) ([C.1150]) ([C.1151]) ([C.1152]) ([C.1153]) ([C.1154]) ([C.1155]) ([C.1156]) ([C.1157]) ([C.1158]) ([C.1159]) ([C.1160]) ([C.1161]) ([C.1162]) ([C.1163]) ([C.1164]) ([C.1165]) ([C.1166]) ([C.1167]) ([C.1168]) ([C.1169]) ([C.1170]) ([C.1171]) ([C.1172]) ([C.1173]) ([C.1174]) ([C.1175]) ([C.1176]) ([C.1177]) ([C.1178]) ([C.1179]) ([C.1180]) ([C.1181]) ([C.1182]) ([C.1183]) ([C.1184]) ([C.1185]) ([C.1186]) ([C.1187]) ([C.1188]) ([C.1189]) ([C.1190]) ([C.1191]) ([C.1192]) ([C.1193]) ([C.1194]) ([C.1195]) ([C.1196]) ([C.1197]) ([C.1198]) ([C.1199]) ([C.1200]) ([C.1201]) ([C.1202]) ([C.1203]) ([C.1204]) ([C.1205]) ([C.1206]) ([C.1207]) ([C.1208]) ([C.1209]) ([C.1210]) ([C.1211]) ([C.1212]) ([C.1213]) ([C.1214]) ([C.1215]) ([C.1216]) ([C.1217]) ([C.1218]) ([C.1219]) ([C.1220]) ([C.1221]) ([C.1222]) ([C.1223]) ([C.1224]) ([C.1225]) ([C.1226]) ([C.1227]) ([C.1228]) ([C.1229]) ([C.1230]) ([C.1231]) ([C.1232]) ([C.1233]) ([C.1234]) ([C.1235]) ([C.1236]) ([C.1237]) ([C.1238]) ([C.1239]) ([C.1240]) ([C.1241]) ([C.1242]) ([C.1243]) ([C.1244]) ([C.1245]) ([C.1246]) ([C.1247]) ([C.1248]) ([C.1249]) ([C.1250]) ([C.1251]) ([C.1252]) ([C.1253]) ([C.1254]) ([C.1255]) ([C.1256]) ([C.1257]) ([C.1258]) ([C.1259]) ([C.1260]) ([C.1261]) ([C.1262]) ([C.1263]) ([C.1264]) ([C.1265]) ([C.1266]) ([C.1267]) ([C.1268]) ([C.1269]) ([C.1270]) ([C.1271]) ([C.1272]) ([C.1273]) ([C.1274]) ([C.1275]) ([C.1276]) ([C.1277]) ([C.1278]) ([C.1279]) ([C.1280]) ([C.1281]) ([C.1282]) ([C.1283]) ([C.1284]) ([C.1285]) ([C.1286]) ([C.1287]) ([C.1288]) ([C.1289]) ([C.1290]) ([C.1291]) ([C.1292]) ([C.1293]) ([C.1294]) ([C.1295]) ([C.1296]) ([C.1297]) ([C.1298]) ([C.1299]) ([C.1300]) ([C.1301]) ([C.1302]) ([C.1303]) ([C.1304]) ([C.1305]) ([C.1306]) ([C.1307]) ([C.1308]) ([C.1309]) ([C.1310]) ([C.1311]) ([C.1312]) ([C.1313]) ([C.1314]) ([C.1315]) ([C.1316]) ([C.1317]) ([C.1318]) ([C.1319]) ([C.1320]) ([C.1321]) ([C.1322]) ([C.1323]) ([C.1324]) ([C.1325]) ([C.1326]) ([C.1327]) ([C.1328]) ([C.1329]) ([C.1330]) ([C.1331]) ([C.1332]) ([C.1333]) ([C.1334]) ([C.1335]) ([C.1336]) ([C.1337]) ([C.1338]) ([C.1339]) ([C.1340]) ([C.1341]) ([C.1342]) ([C.1343]) ([C.1344]) ([C.1345]) ([C.1346]) ([C.1347]) ([C.1348]) ([C.1349]) ([C.1350]) ([C.1351]) ([C.1352]) ([C.1353]) ([C.1354]) ([C.1355]) ([C.1356]) ([C.1357]) ([C.1358]) ([C.1359]) ([C.1360]) ([C.1361]) ([C.1362]) ([C.1363]) ([C.1364]) ([C.1365]) ([C.1366]) ([C.1367]) ([C.1368]) ([C.1369]) ([C.1370]) ([C.1371]) ([C.1372]) ([C.1373]) ([C.1374]) ([C.1375]) ([C.1376]) ([C.1377]) ([C.1378]) ([C.1379]) ([C.1380]) ([C.1381]) ([C.1382]) ([C.1383]) ([C.1384]) ([C.1385]) ([C.1386]) ([C.1387]) ([C.1388]) ([C.1389]) ([C.1390]) ([C.1391]) ([C.1392]) ([C.1393]) ([C.1394]) ([C.13

式中：

E ——弹性模量，单位为兆帕(MPa)；

P ——载荷，单位为牛顿(N)；

ΔL ——选定加载部分零偏移区的引伸计长度位移，单位为毫米(mm)；

D ——线径，单位为毫米(mm)；

L_G ——加载开始时引伸计长度，单位为毫米(mm)；

b ——试验获得弹性模量的估算偏差，单位为兆帕(MPa)。

对于标准不确定度的计算，实际试验值是必要的。使用图 C.1 b) 中数据值可估算引伸计长度位移。此处，选择 15 MPa 应力，通过使用图 C.1 b) 给出的弹性模量计算值， ΔL 的值可使用公式(C.3)获得：

$$A = \frac{R}{E} \text{ 和 } \Delta L = A \cdot L_G \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

$$A = 1.136 \times 10^{-4} ;$$

$$\Delta L = 1.363 \times 10^{-3} \text{ mm} ;$$

$$R = 15 \text{ MPa} ;$$

$$L_G = 12 \text{ mm} ;$$

$$D = 0.783 \text{ mm} ;$$

另外，

$$P = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot R}{4} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

力 P 以 $P = 7.223 \text{ N}$ 计算。

C.3 灵敏度系数评定

与公式(C.2)有关的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \Delta L}\right)^2 u_2^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial D}\right)^2 u_3^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial L_G}\right)^2 u_4^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial b}\right)^2 u_5^2} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

这些偏微分项统称为灵敏度系数。在每个求导中代入试验值，灵敏度系数 c_i 可按照公式(C.6)~公式(C.9)计算得到：

$$\text{对于 } c_1: \quad c_1 = \frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{4 \cdot L_G \cdot P}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta L} \right) = \frac{4 \cdot L_G}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta L} = 1.829 \times 10^4 \text{ mm}^{-2} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

$$\text{对于 } c_2: \quad c_2 = \frac{\partial}{\partial \Delta L} \left(\frac{4 \cdot L_G \cdot P}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta L} \right) = \frac{-4 \cdot L_G \cdot P}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta L^2} = -9.69 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad \dots\dots (C.7)$$

$$\text{对于 } c_3: \quad c_3 = \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{4 \cdot L_G \cdot P}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta L} \right) = \frac{-8 \cdot L_G \cdot P}{\pi \cdot D^3 \cdot \Delta L^2} = -3.373 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad \dots\dots (C.8)$$

$$\text{对于 } c_4: \quad c_4 = \frac{\partial}{\partial L_G} \left(\frac{4 \cdot L_G \cdot P}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta L} \right) = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta L} = 1.101 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad \dots\dots (C.9)$$

由公式(C.2)对变量 b 的微分可知，灵敏度系数 c_5 是 1。

使用上述灵敏度系数，合成标准不确定度 u_c 最终由公式(C.10)给出：

$$u_c = \sqrt{(c_1)^2 \cdot (u_1)^2 + (c_2)^2 \cdot (u_2)^2 + (c_3)^2 \cdot (u_3)^2 + (c_4)^2 \cdot (u_4)^2 + (c_5)^2 \cdot (u_5)^2} \quad \dots\dots (C.10)$$

式中每个灵敏度系数的平方乘以公式(C.2)中给出的各变量的标准不确定度的平方。

C.4 每个变量的合成标准不确定度

公式(C.10)中标准不确定度 u_i 是力(P)、偏移长度(ΔL)、线径(D)和标距(L_G)的合成标准不确定

度。在本条中,根据已知数据估算每个变量的合成标准不确定度。

力(P)的合成标准不确定度 u_1 是由 A 类和 B 类统计分布组成。通常,力由商用载荷传感器测量。然而,大多数载荷传感器生产商并不会在他们的产品技术参数中给出不确定度的信息。给出的精度及从数据单中获得的其他信息,在确定合成标准不确定度 u_1 之前应首先转化为标准不确定度。通常这些生产商的技术参数被视为误差矩形分布的极限。矩形分布的标准不确定度为该极限除以 $\sqrt{3}$ 。

获得图 C.1 测量结果的载荷传感器的信息见表 C.1。

表 C.1 生产商数据单给出的载荷传感器技术参数

载荷传感器量程 N	精确度等级 拉力/压力/%	零点温度系数 S%/K	灵敏度温度系数 S%/K	30 min 蠕变 S%
5 000	0.25	0.25	0.07	0.07

合成标准不确定度之前,宜将这些技术参数转化为标准不确定度数值。这些数据按照 B 类不确定度处理。认为 $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$) 温度范围为允许试验室条件。

变量如下:

精确度等级: $T_{\text{class}} = 0.25\%$

零点温度系数: $T_{\text{coefzero}} = (0.25 \times 20)\%$

灵敏度温度系数: $T_{\text{coefsens}} = (0.07 \times 20)\%$

30 min 蠕变: $T_{\text{creep}} = 0.07\%$

公式(C.11)描述了载荷的测量,包含表 C.1 中的 4 个误差来源:

$$P = u_p + T_{\text{class}} + T_{\text{coefzero}} + T_{\text{coefsens}} + T_{\text{creep}} \dots\dots\dots (\text{C.11})$$

式中:

u_p ——加载真值。

根据应力-应变曲线测得的 $P = 7.233 \text{ N}$ 实测值,将百分比技术参数转换成载荷的单位(N)。然后假设矩形分布,再将得到的结果转换成标准不确定度,最后得到载荷传感器的合成标准不确定度为:

$$u_1 = \sqrt{\left(\frac{T_{\text{class}} \cdot 7.223}{100\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{T_{\text{coefzero}} \cdot 7.223}{100\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{T_{\text{coefsens}} \cdot 7.223}{100\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{T_{\text{creep}} \cdot 7.223}{100\sqrt{3}}\right)^2} \dots (\text{C.12})$$

$$u_1 = 0.21 \text{ N} \dots\dots\dots (\text{C.13})$$

表 C.2~表 C.4 汇总了位移、线径和标距的不确定度计算。这些计算与前面力的阐述相似。

表 C.2 位移测量不确定度

引伸计位移 mm	A 类高斯分布 蠕变和噪音贡献按照 B.3, $u_A = s/\sqrt{n}$ $2V = 1 \text{ mm}$ $(0.000\ 3\ V/2)/\sqrt{10}$ mm	从图 C.1(b)获得的数据点的 B 类分布 按照 B.4, $u_B = d_w/\sqrt{3} \text{ mm}$ 其中 $d_w = 0.000\ 03$ mm
1.363×10^{-4}	0.000 05	0.000 017
$u_2 = \sqrt{0.000\ 05^2 + 0.001\ 7^2} = 0.000\ 052 \text{ mm}$		

表 C.3 线径测量不确定度

线径 mm	A 类高斯分布 用千分尺 5 次重复测量 $u_A = s/\sqrt{n}$ (0.001 3)/ $\sqrt{5}$ mm	矩形分布半宽 按照生产商数据单精度 $\pm 4 \mu\text{m}$ $u_B = d_w/\sqrt{3}$ mm
0.783	0.000 58	0.002 3
$u_3 = \sqrt{0.000\ 58^2 + 0.002\ 3^2} = 0.002\ 3\ \text{mm}$		

测量引伸计标距,使用分辨率为 20 μm 的立体显微镜。

表 C.4 标距测量不确定度

标距 mm	A 类高斯分布 用千分尺 5 次重复测量 $u_A = s/\sqrt{n}$ (0.002)/ $\sqrt{5}$ mm	矩形分布半宽 按照生产商数据单精度 $\pm 20 \mu\text{m}$ $u_B = d_w/\sqrt{3}$ mm
12	9×10^{-4}	0.011
$u_4 = \sqrt{0.000\ 9^2 + 0.011^2} = 0.011\ \text{mm}$		

最终估算了图 C.1 中给出的应力-应变曲线拟合斜率的不确定度。用图 C.1 b) 趋势线方程计算应力值与实测应力值的最大半宽度差为 $\pm 0.822\ \text{MPa}$ 。使用该值和标距 ($L_G = 12\ \text{mm}$), 引伸计偏移值 ($\Delta L = 0.001\ 363\ \text{mm}$), 弹性模量的 B 类标准不确定度可被估算。重新整理公式 (C.3) 可得到简单公式 (C.14):

$$R = E \cdot A; E = R \cdot \frac{L_G}{\Delta L} \dots\dots\dots (C.14)$$

图 C.1 b) 中弹性模量 B 类测量不确定度为:

$$u_B = \frac{0.822\ \text{MPa} \cdot 12\ \text{mm}}{0.001\ 36\ \text{mm} \cdot \sqrt{3}} = 4\ 180\ \text{MPa} \dots\dots\dots (C.15)$$

考虑到公式 (C.12) 的结果, 并使用公式 (C.10) 中的 4 个变量的灵敏度系数, 最终合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{(1.829 \times 10^4)^2 \cdot (0.21)^2 + (-9.69 \times 10^7)^2 \cdot (0.000\ 052\ 1)^2 + (-3.373 \times 10^5)^2 \cdot (0.002\ 3)^2 + (1.101 \times 10^4)^2 \cdot (0.011)^2 + (1)^2 \cdot (4\ 180)^2} \dots\dots\dots (C.16)$$

$$u_c = 7\ 630\ \text{MPa} \dots\dots\dots (C.17)$$

或 $E = 132\ \text{GPa} \pm 7.6\ \text{GPa} \dots\dots\dots (C.18)$

C.5 规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 的不确定度

规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 应由零偏移弹性模量线沿横坐标平移到 0.2% 应变位置, 并计算该线与原始应力-应变曲线的交点得到。如果拟合的弹性模量线的坐标原点非零, 那么该点与零的偏移也应

考虑。

图 C.1 b) 的回归方程式应有一个 x 轴的偏移:

$$A_{\text{offset}} = -\frac{0.297\ 19}{1\ 320.692} = -0.000\ 23\% \dots\dots\dots (C.19)$$

式中:

A_{offset} ——零应力的应变偏移。

这样,沿横坐标偏移的位置不是准确的 0.200 00%,而是 0.199 77%。表 C.5 显示了使用回归线进行的应力计算[考虑和不考虑公式(C.18)的不确定度计算]。

表 C.5 使用图 C.1 b) 中确定的零偏移回归线计算在 0% 和 0.1% 应变的应力

描述	$\epsilon(\%)$ 应变的不确定度贡献的回归线公式	$\epsilon=0\%$ 应变的应力 MPa	$\epsilon=0.1\%$ 应变的应力 MPa
弹性模量基线	$1\ 320.692\ A + 0.297\ 19$	0.297	132.37
弹性模量 + 7.6 GPa 不确定度贡献(上线)	$1\ 396.692\ A + 0.297\ 19$	0.297	139.97
弹性模量 - 7.6 GPa 不确定度贡献(下线)	$1\ 244.692\ A + 0.297\ 19$	0.297	124.77

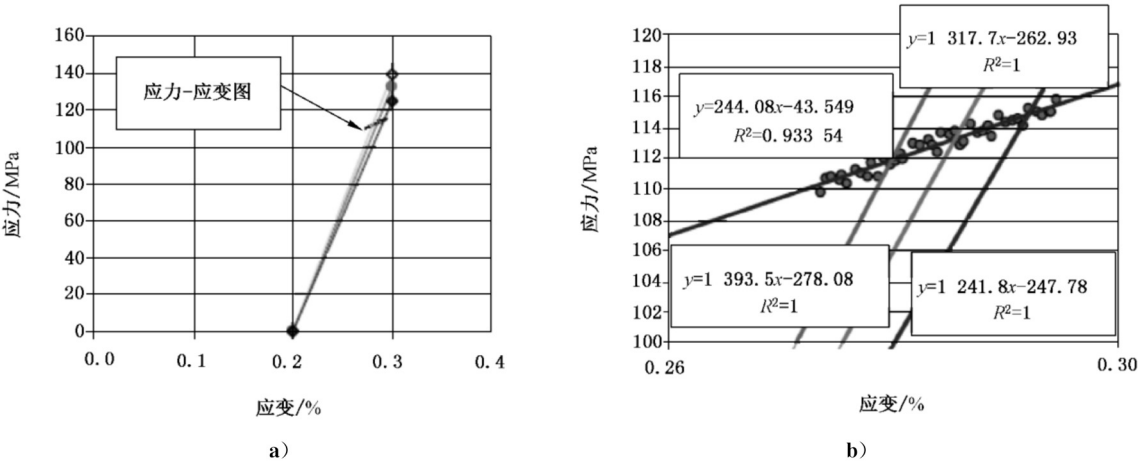


图 a) 显示了 0.2% 偏移回归线和相对于基线加减不确定度贡献的两条线。4 个必要的点构建这 3 条线,一个共同点在零应力,在 0.1% 应变 3 个计算应力值见表 C.5,但是,相应的应变值需偏移 0.2%。三线与原始数据相交区域附近的原始应力-应变曲线也描绘在图 a) 中。图 b) 在放大视图上显示了应力-应变曲线的原始数据和按照表 C.5 计算的偏移线。应力-应变公式的线性回归方程也在图 b) 中显示。

图 C.2 应力-应变曲线

在表 C.5 中 0% 和 0.1% 应变对应的应力是任意选择的两个不同点以确定图 C.2 中的偏移线。0% 和 0.1% 应变值需加上从公式(C.19)中获得的偏移值。

表 C.6 列出了图 C.2 b) 确定的偏移线后的线性回归方程。

表 C.6 计算三条偏移线和线相交区的应力-应变曲线的线性回归方程

方程式描述	线性回归方程 <i>x</i> :应变/%; <i>y</i> :应力/MPa
应力-应变曲线线性部分[见图 C.2 a)]	$y = 244.08x + 43.546$
弹性模量基线偏移	$y = 1\,317.7x - 262.93$
弹性模量+7.6 GPa 不确定度贡献(偏移上线)	$y = 1\,393.5x - 278.08$
弹性模量-7.6 GPa 不确定度贡献(偏移下线)	$y = 1\,241.8x - 247.78$

最终,用表 C.6 的方程计算 3 个交点,确定这些点的应力。表 C.7 显示计算和交点值。规定塑性延伸强度的报告值是第一条线(零偏移)与应力-应变曲线交点的应力值。剩余两个交点的应力值代表规定塑性延伸强度的估算误差界。估算误差界基于弹性模量斜率的不确定度[公式(C.18)]。

表 C.7 三条偏移线与应力-应变曲线交点的应力-应变计算

描述	交点处应力-应变计算的等式组	交点处应变/%	交点处应力/MPa
偏移基线(均值)	$(43.546 + 262.93) / (1\,317.7 - 244.08)$	0.285 463	
	$244.08 \times 0.285\,463 + 43.546$		113.2
偏移上线	$(43.546 + 247.78) / (1\,241.8 - 244.08)$	0.291 995	
	$244.08 \times 0.291\,995 + 43.546$		114.8
偏移下线	$(43.546 + 278.08) / (1\,393.5 - 244.08)$	0.279 819	
	$244.08 \times 0.279\,819 + 43.546$		111.8

规定塑性延伸强度的标准不确定度是 B 类测定,可用公式(C.20)估算:

$$u_B = - \frac{114.82 - 111.84}{2\sqrt{3}} = 0.858 \text{ MPa} \dots\dots\dots (C.20)$$

图 C.2 b)显示的原始数据点分散也应在最终不确定度评定时考虑。表 C.8 显示图 C.2 b)中的应力-应变测量数据。另外,表 C.8 的第 3 列和第 7 列给出了所关注区间内应用线性拟合公式计算出来的应力值。最后,第 4 列和第 8 列显示测量值与计算值的差异。

从表 C.8 第 4 列和第 8 列获得应力的计算值和测量值极差为:

$$-0.677\,9 \text{ MPa 和 } +0.813\,4 \text{ MPa} \dots\dots\dots (C.21)$$

极差代表随机误差的观察极限,用公式(C.22)转化为标准不确定度:

$$u_B = - \frac{0.813\,4 - (-0.677\,9)}{2\sqrt{3}} = 0.430\,5 \text{ MPa} \dots\dots\dots (C.22)$$

0.2%规定塑性延伸强度的合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{0.858^2 + 0.430\,5^2} = 0.96 \text{ MPa} \dots\dots\dots (C.23)$$

最终,0.2%规定塑性延伸强度结果为:

$$R_{p0.2} = 113.2 \text{ MPa} \pm 0.96 \text{ MPa} \dots\dots\dots (C.24)$$

表 C.8 测得的应力-应变数据和基于测量数据线性拟合计算的应力

应变 %	应力 MPa	按照回归方程 计算的应力 MPa	计算值与观察 值差异 MPa	应变 %	应力 MPa	按照回归方程 计算的应力 MPa	计算值与观察 值差异 MPa
0.273 6	109.74	110.321 9	0.581 9	0.284 4	113.63	112.969 9	—0.660 1
0.274 0	110.73	110.408 1	—0.321 9	0.285 0	113.51	113.137 4	—0.372 6
0.274 4	110.81	110.528 8	—0.281 2	0.285 6	113.71	113.277 8	—0.432 2
0.275 2	110.56	110.720 9	0.160 9	0.286 0	112.89	113.383 8	0.493 8
0.275 5	110.90	110.780 1	—0.119 9	0.286 3	113.08	113.457 7	0.377 7
0.275 9	110.36	110.895 8	0.535 8	0.286 9	114.23	113.585 8	—0.644 2
0.276 6	111.29	111.056 0	—0.234 0	0.287 5	113.69	113.748 3	0.058 3
0.277 2	111.02	111.206 2	0.186 2	0.288 1	113.77	113.888 7	0.118 7
0.277 8	110.78	111.346 6	0.566 6	0.288 5	114.08	113.979 9	—0.100 1
0.278 1	111.75	111.435 3	—0.314 7	0.288 8	113.38	114.063 6	0.683 6
0.278 6	110.75	111.563 4	0.813 4	0.289 4	114.79	114.221 3	—0.568 7
0.279 1	112.08	111.671 8	—0.408 2	0.290 0	114.29	114.366 6	0.076 6
0.279 7	111.62	111.829 4	0.209 4	0.290 7	114.47	114.534 1	0.064 1
0.280 3	111.83	111.960 0	0.130 0	0.291 2	114.59	114.649 9	0.059 9
0.280 7	112.27	112.078 2	—0.191 8	0.291 7	114.07	114.773 1	0.703 1
0.280 9	111.94	112.125 0	0.185 0	0.292 1	115.23	114.888 8	—0.341 2
0.281 7	113.00	112.322 1	—0.677 9	0.292 8	115.01	115.056 4	0.046 4
0.282 4	112.86	112.497 0	—0.363 0	0.293 3	114.81	115.179 5	0.369 5
0.283 2	113.14	112.674 3	—0.465 7	0.293 9	115.03	115.327 3	0.297 3
0.283 5	112.86	112.760 6	—0.099 4	0.294 1	114.97	115.379 0	0.409 0

参 考 文 献

- [1] Research report on the standardization of superconductive materials for new power generation system. NMC, Osaka Science and Technology Center, 2001, 23
- [2] M. SHIMADA, M. HOJO, H. MORIAI and K. OSAMURA. Jpn. Cryogenic Eng., 33, 1998, 665
- [3] K. KATAGIRI, K. KASABA, M. HOJO, K. OSAMURA, M. SUGANO, A. KIMURA and T. OGATA. Physica C, 357-360, 2001, 1302-1305
- [4] Research report on the standardization of superconductive materials for new power generation system. NMC, Osaka Science and Technology Center, 2002, 25
- [5] K. OSAMURA, A. NYILAS, M. SHIMADA, H. MORIAI, M. HOJO, T. FUSE and M. SUGANO. Adv. Superconductivity XI, 1999, 1515
- [6] A. YILAS, Strain sensing systems tailored for tensile measurement of fragile wires. Supercond. Sci. Technol., 18, 2005, 409-415
- [7] A. NYILAS, K. WEISS, and M. THOENER, M. HOJO, K. OSAMURA, and K. KATAGIRI. On the measurement of tensile properties of superconducting Nb₃Sn wires at ambient temperature and at cryogenic environment. Advances in Cryogenic Engineering (Materials) 52, edited by U. B. Balachandran et al., Plenum Press, New York, 2006, 582-589
- [8] A. NYILAS. Transducers for sub-micron displacement measurements at cryogenic temperatures. in Advances in Cryogenic Engineering (Materials) 52, edited by U. B. Balachandran et al., Plenum Press, New York, 2006, 27-34
- [9] K. OSAMURA et al. International Round Robin Test for Mechanical Properties of Nb₃Sn Superconducting Wires. Supercond. Sci. Technol., 21, 2008, 045006
- [10] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995)
- [11] ISO/IEC Guide 99:2007, International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM)
- [12] B. N. TAYLOR, and C. E. KUYATT. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. NIST Technical Note 1297, 1994 (<<http://physics.nist.gov/Pubs/pdf.html>>)
- [13] J. KRAGTEN. Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique. Analyst, 1994, 119, 2161-2166
- [14] EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Second edition:2000, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement
- [15] 可见于 <http://www.gum.dk/e-wb-home/gw_home.html>
- [16] 可见于 <<http://www.isgmax.com/>>
- [17] E. CHURCHILL, H. K. HARRY, and R. COLLE. Expression of the Uncertainties of Final Measurement Results. NBS Special Publication 644, 1983
- [18] JAB NOTE Edition 1:2003, Estimation of Measurement Uncertainty (Electrical Testing / High Power Testing). (可见于: <<http://www.iaac.org.mx/Documents/Uncontrolled/Library/Jap->

anAccredBoard/nws-labtopix.pdf)).

[19] ASTM E 83-85, Standard Practice for Verification and Classification of Extensometers

[20] ASTM E 111-82, Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
力学性能测量 反应后的 Nb_3Sn
复合超导线室温拉伸试验方法

GB/T 38841—2020/IEC 61788-19:2013

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2020年6月第一版

*

书号: 155066 • 1-64966

版权专有 侵权必究



GB/T 38841-2020