拉伸试验检测结果不确定度的评定*

马 越[1],刘玉荣[2],岳 林[1],赵广林[2],裴福莉[2],张琢晶[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司化检验中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章采用某钢管公司生产的规格为 Φ114.3 mm×7.37 mm,钢级为 L80－1 的钢管,评定它的屈服强度 $R_{t0.5}$,抗拉强度 R_m,断后伸长率 $A_{50\ mm}$ 的不确定度结果。通过模型建立,对不确定度的来源分析及每一个分量的评定以及合成标准不确定度的计算,得出每一个检测数值的扩展不确定度分别为: $U(R_{t0.5})$ = 20 N/mm^2, $U(R_m)$ = 5 N/mm^2, $U(A)$ = 0.8%; 相对扩展不确定度分别是: $U_{rel}(R_{t0.5})$ = 3%, $U_{rel}(R_m)$ = 1%, $U_{rel}(A)$ = 3%。

关键词: L80－1 钢级; 性能; 不确定度
中图分类号: TG142.15 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009－5438(2019)04－0093－06
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.04.026

Evaluation on Uncertainties for Detecting Results of Tensile Test

Ma Yue[1], *Liu Yu－rong*[2], *Yue Lin*[1], *Zhao Guang－lin*[2], *Pei Fu－li*[2], *Zhang Zhuo－jing*[2]

(1. *Chemical Inspection Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, the uncertainties for yield strength $R_{t0.5}$, tensile strength R_m and elongation after fracture $A_{50\ mm}$ of L80－1 pipe with specification of Φ114.3 mm×7.37 mm manufactured by a Tube Co. are evaluated. The expanded uncertainties of each detected value are $U(R_{t0.5})$ = 20 N/mm^2, $U(R_m)$ = 5 N/mm^2, $U(A)$ = 0.8% as well as their relative expanded uncertainties are $U_{rel}(R_{t0.5})$ = 3%, $U_{rel}(R_m)$ = 1%, $U_{rel}(A)$ = 3%, which are obtained through establishing model, analyzing sources of uncertainties, evaluating each component and calculating combined standard uncertainties.

Key words: L80－1 steel grade; property; uncertainties

API 5CT 产品标准中对于 L80－1 钢级钢管的拉伸各项性能要求如下: 屈服强度 552 MPa ≤ $R_{t0.5}$ ≤ 655 MPa,抗拉强度 R_m ≥655 MPa,断后伸长率 A 应根据拉伸试样的横截面积和规定最小抗拉强度来计算[1]。其中屈服强度的允许区间比较窄,仅为 103 MPa。实际检测过程中会有各方面的因素对检测结果的不确定度产生影响。所谓不确定度,是由测量结果给出的被测量估计值的可能误差的度量,它是用来表征被测量的真值所处范围的评定。如果检测结果的不确定度过大,由不确定度而带来的产品结果合格性的误判将会对生产商和用户均产生影响。对于该钢检测结果不确定度的评定显得尤为必

* 收稿日期: 2019－06－01
作者简介: 马 越(1968－),男,回族,内蒙古省包头市人,工程师,主要从事金属材料物理性能检验等相关工作。

要。性能检测过程中的每一个步骤以及所用到的每一台仪器设备均会带来检测结果的不确定度，对于不确定的来源进行分析并对每一项影响程度进行评定，计算最终结果的不确定数值，并找出影响不确定的关键因素并在能力范围内加以控制，保证最终结果的不确定度数值最小。

1 评定条件

(1) 测量方法: ASTM A370—18《钢制品力学性能试验的标准试验方法和定义》[2]。

(2) 评定依据: JJF1059—2012《测量不确定度评定与表示》[3]。

(3) 环境条件: 温度 10 ~ 35 ℃，温度波动小于 2 ℃/h，本试验温度为(23 ± 2) ℃，相对湿度小于 80%。

(4) 测量设备: 型号为 KN600 - J4A 电液伺服万能试验机，检定证书给出为 0.5 级试验机(载荷相对最大允许误差为 0.5%)。型号为 MFA2 的引伸计，检定证书给出的等级为 B - 2 级。经计量检定合格的壁厚千分尺、游标卡尺和打点机。

(5) 被测对象: 规格为 Φ114.3 mm × 7.37 mm，钢级为 L80 - 1 的钢管，检测它的屈服强度 $R_{t0.5}$，抗拉强度 R_m，断后伸长率 $A_{50\ mm}$。

(6) 测量过程: 根据 ASTM A370—2018，在规定环境条件下(包括万能材料试验机处于受控状态)，选用试验机的 600 kN 量程，在标准规定的加载速率下，对试样施加轴向拉力，测试试样的屈服力 $F_{t0.5}$ 和最大力 F_m，用计量合格的游标卡尺、壁厚千分尺和划线机分别测量试样的原始宽度、厚度，原始标距和断后标距，最后通过计算得到屈服强度 $R_{t0.5}$，抗拉强度 R_m 和断后伸长率 $A_{50\ mm}$。

2 数学模型

根据 ASTM A370—2018 标准[2]

屈服强度: $R_{t0.5} = \dfrac{F_{t0.5}}{S_0} = \dfrac{F_{t0.5}}{ab}$

抗拉强度: $R_m = \dfrac{F_m}{S_0} = \dfrac{F_m}{ab}$

断后伸长率: $A_{50\ mm} = \dfrac{\overline{L_u} - L_0}{L_0} \times 100\%$

式中: $F_{t0.5}$ 和 F_m 分别为屈服力和最大力，N; S_0 为试样平行长度的原始横截面积，mm^2; a 为试样的厚度，mm; b 为试样的宽度，mm; L_0 为试样原始标距值(本例 L_0 为 50 mm); $\overline{L_u}$ 为试样拉断后的标距均值，mm; $A_{50\ mm}$ 为断后伸长率，%。

3 测量不确定度来源的分析

对于钢管的拉伸试验，经分析，测量结果不确定度的主要来源是: 试样尺寸(试样宽度 b，钢管壁厚 a) 测量所引起的不确定度分量 $u(a)$ 和 $u(b)$; 试验力值测量所引起的不确定度分量 $u(F_{t0.5})$ 和 $u(F_m)$，试样原始标距和断后标距长度测量所引起的不确定度分量 $u(L_0)$ 和 $u(L_u)$。每个分量中均包括了检测人员测量重复性所带来的不确定度和测量设备或量具误差带来的不确定度。有的分量中还包括了钢管材质不均匀性所带来的不确定度。另外，试验方法标准规定，不管是强度指标，还是塑性指标，其结果都必须按标准的规定进行数值修约，所以还有数值修约所带来的不确定度分量 $u(R_{t0.5,rou})$，$u(R_{m,rou})$ 和 $u(A_{50\ mm,rou})$。

4 标准不确定度分量的评定

4.1 试样尺寸和标距测量引起不确定度分量评定

板状试样的试样厚度用 0 ~ 25 mm 的壁厚千分尺(计量合格，极限误差为 ± 0.01 mm) 测量; 试样宽度 b 和断后标距 L_u 用 0 ~ 200 mm 的游标卡尺(计量合格，极限误差为 ± 0.02 mm) 进行测定; 原始标距 L_0 用 10 ~ 300 mm 的标点机(计量合格，极限误差为 ± 0.5%) 测量。在重复条件下对一试样进行了五次测定，共积累了 10 组数据(两个测试人员对同一试样在重复条件下个进行了五组规范化的测量)，部分数据见表 1。

表 1　试样宽度 b 和厚度 a 及拉断后的标距 L_u 测量数据表

测量参数	测量次数	测量数据的组数 j									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a_{ij}	1	7.41	7.39	7.4	7.41	7.39	7.38	7.39	7.39	7.39	7.41
	2	7.38	7.41	7.42	7.39	7.38	7.37	7.38	7.38	7.38	7.4
	3	7.4	7.4	7.41	7.38	7.38	7.39	7.39	7.39	7.39	7.4
	4	7.41	7.39	7.41	7.39	7.39	7.4	7.39	7.4	7.37	7.39
	5	7.42	7.39	7.42	7.41	7.4	7.38	7.39	7.38	7.39	7.41
a_j		7.404	7.396	7.412	7.396	7.388	7.384	7.388	7.388	7.384	7.402
$s_{a,j}$		0.015 166	0.008 944	0.008 367	0.013 416	0.00 8367	0.011 402	0.004 472	0.008 367	0.008 944	0.008 367
b_j		25.444	25.4	25.404	25.396	25.408	25.396	25.388	25.432	25.392	25.404
$s_{b,j}$		0.016 733	0.02	0.021 909	0.016 733	0.017 889	0.016 733	0.010 954	0.010 954	0.017 889	0.016 733
$L_{u,j}$		66.54	66.512	66.552	66.548	66.52	66.544	66.536	66.524	66.5	66.54
$s_{Lu,j}$		0.04	0.022 804	0.070 143	0.046 043	0.024 495	0.043 359	0.032 863	0.021 909	0.031 623	0.054 772

4.1.1　**原始厚度不确定度分量 $u_1(a)$**

试样的原始厚度 a 测量重复性所引起的不确定度分量 $u_1(a)$ 计算如下，根据公式[4] 计算 a 的合成样本标准差:

$$S_{p,a}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(S_{a,j})^2}{m}}=0.01\ \text{mm}$$

自由度为 $\nu_{p,a}=m(n-1)=10\times(5-1)=40$

为判定合并样本标准差 $S_{p,a}$ 是否可以应用，特进行以下运算。

标准差 $S_{a,j}$ 数列的平均值:

$$\overline{S_a}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}S_{a,j}=0.009\ 581\ 1\ \text{mm}$$

标准差 $S_{a,j}$ 的标准差:

$$\hat{\sigma}(S_a)=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(S_{a,j}-\overline{S_a})^2}{m-1}}=0.003\ 019\ \text{mm}$$

$$\frac{S_{p,a}}{\sqrt{2(n-1)}}=\frac{0.01}{\sqrt{2\times(5-1)}}=0.003\ 535\ 53\ \text{mm}$$

$$\hat{\sigma}(S_a)<\frac{S_{p,a}}{\sqrt{2(n-1)}}$$

说明检测状态稳定，可以使用同一个高可靠性的合并样本标准差 $S_{p,a}$ 来评定测量值 a 时的重复性所引起的不确定度，即:

$$u_1(a)=\frac{S_{p,a}}{\sqrt{k}}$$

由于在实际测试工作中一般是按 ASTM A370—2018 的规定[2] 在平行部的中间测定一次，于是 $k=1$，则有 $u_1(a)=\frac{S_{p,a}}{\sqrt{k}}=S_{p,a}=0.01$ mm。

4.1.2　**原始宽度不确定度分量 $u_1(b)$**

同理计算 b 的合成样本标准差:

$S_{p,b}=0.016\ 970\ 563$ mm，自由度 $\nu_{p,b}=40$，计算出 $\hat{\sigma}(S_b)<\frac{S_{p,b}}{\sqrt{2(n-1)}}$。检测状态稳定，即 $u_1(b)=\frac{S_{p,b}}{\sqrt{k}}=0.016\ 970\ 563$ mm。

4.1.3　**断后标距不确定度分量 $u_1(L_u)$**

同理计算 L_u 的合成样本标准差: $S_{p,Lu}=0.041\ 472\ 883$ mm，自由度为 $\nu_{p,Lu}=40$，因计算出 $\hat{\sigma}(S_{Lu})>\frac{S_{p,Lu}}{\sqrt{2(n-1)}}$，所以，不可以采用同一个 $S_{p,Lu}$ 来评定 L_u 的不确定度，而采用 $S_{Lu,j}$ 中的 $S_{Lu,max}$ 来评定。所以，$u_1(L_u)=S_{Lu,max}=S_{Lu,3}=0.070\ 143$ mm。自由度为 $\nu=n-1=4$，这说明对于 L_u 的测量，因为每次测量前需要重新将试样断裂处仔细配接，因为不同的人员，甚至同一人员每次配接的紧密程度、符合程度、两段试样的同轴度等很难掌握得每次完全一样，所以导致了 L_u 的测试不太稳定，从表 1 中各组数据的标准差可看出各组之间的标准差差异较大，而对于试样原始厚度 a 和原始宽度 b 的测量就不存在此类问题，一般各组数据的标准差之间差异就较小，说明测量状态稳定，经判定，可用高可靠度的合并样本标准差来评定测量不确定度。而对于 L_u 的测试，就只能用 $S_{Lu,j}$ 中的 $S_{Lu,max}$ 来进行评定。由于在实际测试中以单次测量值 $(k=1)$ 作为测量结果。

4.1.4　**原始厚度不确定度分量 $u_2(a)$**

试样原始厚度 a 是用 0 ~ 25 mm 的壁厚千分尺

测量的，经计量合格，证书给出的极限误差为 ±0.01 mm，其出现在此区间的概率是均匀的即服从均匀分布，它所引起的标准不确定度可用 B 类评定方法评定[4]，为：

$u_2(a) = \frac{A}{\sqrt{3}} = 0.005\ 773\ 503$ mm，自由度 $\nu = 50$。

4.1.5 原始宽度 b 不确定度分量 $u_2(b)$

同理，$u_2(b) = \frac{A}{\sqrt{3}} = 0.011\ 547\ 005$ mm，自由度 $\nu = 50$。

4.1.6 断后标距 L_u 不确定度分量 $u_2(L_u)$

同理，$u_2(L_u) = \frac{A}{\sqrt{3}} = 0.011\ 547\ 005$ mm，自由度 $\nu = 50$。

4.1.7 原始厚度 a 的测量不确定度分量 $u(a)$

因为上述的 $u_1(a)$ 和 $u_2(a)$ 相互独立，所以矩形试样原始厚度的测量标准不确定度可用方和根的公式合成，即 $u^2(a) = u_1^2(a) + u_a^2(a)$，将数据代入得：

$u(a) = 0.011\ 547$ mm

4.1.8 原始宽度 b 的测量不确定度分量 $u(b)$

同理，$u(b) = 0.020\ 526$ mm

4.1.9 断后标距 L_u 的测量不确定度分量 $u(L_u)$

同理，$u(L_u) = 0.071\ 087$ mm

4.1.10 原始标距 L_0 的测量不确定度分量 $u(L_0)$

同理，$u_{rel}(L_0) = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.2887\%$

$u(L_0) = |L_0| \times u_{rel}(L_0) = 0.144\ 4$ mm

4.2 试验力值测量误差所引起的不确定度分量

4.2.1 试验机示值误差所引起的标准不确定度分量

拉伸试验所使用的 600 kN 液压万能试验机，经检定为 0.5 级，其示值误差为 ±0.5%，示值误差出现在区间 [−0.5% ~ +0.5%] 的概率是均匀的，可用 B 类评定[4]，即：

$u_{1rel}(F_{t0.5}) = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.002\ 886\ 75$

式中：$u_{1rel}(F_{t0.5})$ 为由于试验机示值误差所引入的屈服力值的相对标准不确定度，因为 $F_{t0.5} = 115.07$ kN，所以此项绝对分量为：

$u_1(F_{t0.5}) = F_{t0.5} \times u_{1rel}(F_{t0.5}) = 115.07\ \text{kN} \times 0.002\ 887 = 332.21$ N，自由度 $\nu = 50$。

同理，$u_1(F_m) = F_m \times u_{1rel}(F_m) = 133.09\ \text{kN} \times 0.002\ 887 = 384.23$ N，自由度 $\nu = 50$。

4.2.2 标准测力仪所引入的标准不确定度分量

试验机是借助于 0.3 级标准测力仪进行校准的，该校准源的不确定度为 0.3%，置信因子为 2，故由此引入的 B 类相对标准不确定度为：

$u_{2rel}(F_{t0.5}) = \frac{0.3\%}{2} = 0.001\ 5$；$\nu = 50$

对于屈服力，可求的得绝对分量为：$u_2(F_{t0.5}) = F_{t0.5} \times u_{2rel}(F_{t0.5}) = 115.07\ \text{kN} \times 0.001\ 5 = 172.605$ N

对于最大力：$u_{2rel}(F_m) = \frac{0.3\%}{2} = 0.001\ 5$；$\nu = 50$。

同理，可求的得绝对分量为：$u_2(F_m) = F_m \times u_{2rel}(F_m) = 133.09\ \text{kN} \times 0.001\ 5 = 199.635$ N。

4.2.3 引伸计所引入的测量不确定度

根据 ASTM A370—2018[2] 方法标准要求，进行拉伸试验测定 $F_{t0.5}$ 可使用的引伸计为 C 级及以上精度的引伸计。试验所用引伸计为 B－2 级，根据 ASTM E83—2016 引伸计系统的校准和分级系统校准规范中，其标距误差和系统相对误差均为 ±0.5%[5]。引伸计的标距误差系统相对误差引起的 $F_{t0.5}$ 测量误差与拉伸试验曲线在误差区间的斜率有关，根据试验所得的拉伸曲线，曲线斜率 $G = 3.846$，因为标距误差和系统相对误差出现在误差区间的概率都是均匀的，满足矩形分布，$k = \sqrt{3}$，引伸计标距误差和系统相对误差引起的 B 类评定相对校准不确定度数值相等，彼此不相关，所以，合成标准不确定度为：

$$U_{3rel}(F_{t0.5}) = \sqrt{\left[\left(G\frac{A}{k}\right)^2 + G\left(\frac{A}{k}\right)^2\right]}$$

式中：第一项 $G\frac{A}{k}$ 为引伸计标距的贡献；第二项 $G\frac{A}{k}$ 为引伸计系统相对误差的贡献。于是，上式可写成：

$$u_{3rel}(F_{t0.5}) = \sqrt{2\left(\frac{GA}{k}\right)^2} = 0.816\ 5\ GA。$$

式中，A 为引伸计标距误差或引伸计系统相对误差区间的半宽度，数值为 0.5%；G 为拉伸试验曲线在引伸计误差区间的斜率，根据试验所得的 $F - \triangle L$ 曲线可知，$G = \frac{\triangle F/F_{t0.5}}{\triangle\triangle L/\triangle L_0} = \frac{1}{13/50} = 3.846$。转化为绝对不确定度是：$u_3(F_{t0.5}) = 0.816\ 5\ GA \times F_{t0.5} = 0.004\ 082\ 5\ G \times F_{t0.5} = 1\ 806.7$ N。

4.2.4 合成标准不确定度

由于试验机示值误差、标准测力仪、引伸计误差三方面的因素，所引起的测量不确定彼此不相关，所以力值测量的标准不确定度可合成为:

$u(F_{t0.5}) = 1\ 845\ \text{N}$

$u(F_m) = 433\ \text{N}$

4.3　数值修约所引起的标准不确定度分量

检验标准 ASTM A370—2018 标准的 A8.1.1[2] 规定“测定值或计算值应根据所用产品标准进行圆整。当没有规定的圆整方法时，应采用实用规程 E29 的圆整方法进行圆整。”API 5CT 产品标准要求规定: 强度性能值修约至 1Mpa; 断后伸长率修约至 1%。这必定引入了不确定度，这可用 B 类方法来评定。

对于本例:

$$R_{t0.5} = \frac{F_{t0.5}}{S_0} = 612.79\ \text{MPa} = 613\ \text{MPa}$$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} = 708.76\ \text{MPa} = 709\ \text{MPa}$$

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} = 31.06\% = 31\%$$

因为强度的修约为 1 MPa，半宽为 1/2，在修约区间的分布为均匀分布，所以，有: $u(R_{t0.5,rou}) = \frac{A}{\sqrt{3}} = 0.29\ \text{N/mm}^2$，同理，$u(R_{m,rou}) = \frac{A}{\sqrt{3}} = 0.29\ \text{N/mm}^2$，自由度均为 ∞。

断后伸长率数值修约引入的不确定度为:

$u(A_{rou}) = \frac{A}{\sqrt{3}} = 0.29\%$，自由度为 ∞。

5　合成标准不确定度的计算

因试验力、试样原始尺寸、标距的测量所引起的不确定度，以及数值修约(最终结果经数值修约得到，所以对于最终结果而言，修约也相当于输入)所引入的不确定度之间彼此独立不相关。因此根据合成标准不确定度的计算公式，可得到各个分量的合成标准不确定度。其中，计算所需的标准不确定度分量见表 2。

表 2　标准不确定度分量汇总表

分量 $u(x_i)$	不确定来源	标准不确定度分量 $u(x_i)$ 之值	分量 $u(x_i)$	不确定来源	标准不确定度分量 $u(x_i)$ 之值
$u(a)$	试样原始厚度的测量	$u(a) = 0.011\ 547$ mm	$u(F_{t0.5})$	试样屈服强度的测定	$u(F_{t0.5}) = 1\ 845$ N
	测量重复性	$u_1(a) = 0.01$ mm		试验机示值误差	$u_1(F_{t0.5}) = 332.21$ N
	千分尺误差	$u_2(a) = 0.005\ 773\ 503$ mm		标准测力计	$u_2(F_{t0.5}) = 172.605$ N
$u(b)$	试样原始宽度的测量	$u(b) = 0.020\ 526$ mm		引伸计的误差	$u_3(F_{t0.5}) = 1806.7$ N
	测量重复性	$u_1(b) = 0.016\ 970\ 563$ mm	$u(F_m)$	试样抗拉强度的测定	$u(F_m) = 433$ N
	游标卡尺误差	$u_2(b) = 0.011\ 547\ 005$ mm		试验机示值误差	$u_1 = 384.23$ N
$u(L_0)$	试样原始标距的确定	$u(L_0) = 0.144\ 4$ mm		标准测力计	$u_2(F_m) = 199.635$ N
$u(L_u)$	测量试样断后标距	$u(L_u) = 0.071\ 087$ mm	$u(R_{t0.5,rou})$	屈服强度计算值的数值修约	$u(R_{t0.5,rou}) = 0.29\ \text{N/mm}^2$
	测量重复性	$u_1(L_u) = 0.070\ 143$ mm	$u(R_{m,rou})$	抗拉强度计算值的数值修约	$u(R_{m,rou}) = 0.29\ \text{N/mm}^2$
	游标卡尺误差	$u_2(Lu) = 0.011\ 547\ 005$ mm	$u(A_{rou})$	断后伸长率的数值修约	$u(A_{rou}) = 0.29\%$

因为

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^{N} c_i^2 u^2(x_i)$$

所以 $u_c^2(R_{t0.5}) = u_1^2 R_{t0.5} + u_2^2 R_{t0.5} + u_3^2 R_{t0.5} + u_4^2 R_{t0.5}$

即 $u_c^2(R_{t0.5}) = c_{F_{t0.5}}^2 u^2(F_{t0.5}) + c_{a,t0.5}^2 u^2(a) + c_{b,t0.5}^2 u^2(b) + u^2(R_{t0.5,rou})$

同理有: $u_c^2(R_m) = c_{F_m}^2 u^2(F_m) + c_{a,m}^2 u^2(a) + c_{b,m}^2 u^2(b) + u^2(R_{m,rou})$

$u_c^2(A) = c_{L_u}^2 u^2(L_u) + c_{L_0}^2 u^2(L_0) + u^2(A_{rou})$

由数学模型对每个输入量求偏导数，可得相应的不确定度灵敏系数:

$$c_{F_{t0.5}} = c_{F_m} = \frac{1}{ab} = \frac{1}{7.39 \times 25.41} = 0.0053$$

$$c_{a,t0.5} = -\frac{F_{t0.5}}{a^2 b} = -\frac{115\ 070}{7.39^2 \times 25.41} = -82.92$$

$$c_{b,t0.5} = -\frac{F_{t0.5}}{ab^2} = -\frac{115\ 070}{7.39^2 \times 25.41^2} = -24.12$$

$$c_{a,m} = -\frac{F_m}{a^2 b} = -\frac{113\ 090}{7.39^2 \times 25.41} = -95.91$$

$$c_{b,m} = -\frac{F_m}{ab^2} = -\frac{113\ 090}{7.39 \times 25.41^2} = -27.89$$

$$c_{L_u} = \frac{1}{L_0} = \frac{1}{50} = 0.02$$

$$c_{L_0} = -\frac{L_u}{L_0^2} = -\frac{65.53}{50^2} = -0.026$$

将不确定度灵敏系数数值以及相应的各数据代入公式，可得到：

$c_c(R_{t0.5}) = 9.84$

$c_c(R_m) = 2.63$

$c_c(A) = 0.004$

6 扩展不确定度

扩展不确定度是由合成标准不确定度乘以包含因子 k 来得到的。通常推荐 k 取2，即 $k = 2$ 区间的置信概率约为95%(95.45%)。所以对于本例有：

$U(R_{t0.5}) = ku_c(R_{t0.5}) = 2 \times 9.84 = 19.68 = 20\ N/mm^2$

$U(R_m) = ku_c(R_m) = 2 \times 2.63 = 5.26 = 5\ N/mm^2$

$U(A) = ku_c(A) = 2 \times 0.004 = 0.008 = 0.8\%$

用相对扩展不确定度来表示，则分别是：

$$U_{rel}(R_{t0.5}) = \frac{U(R_{t0.5})}{R_{t0.5}} = \frac{20}{613} = 3.26\% = 3\%$$

$$U_{rel}(R_m) = \frac{U(R_m)}{R_m} = \frac{5}{709} = 0.705\% = 1\%$$

$$U_{rel}(A) = \frac{U(A)}{A} = \frac{0.8\%}{31\%} = 2.58\% = 3\%$$

7 评定结果及分析

本例所评定的L80－1钢级无缝钢管的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率测量结果的不确定度报告如下：

$R_{t0.5} = 613\ N/mm^2$，$U = 20\ N/mm^2$，$k = 2$

$R_m = 709\ N/mm^2$，$U = 5\ N/mm^2$，$k = 2$

$A = 31\%$，$U = 0.8\%$，$k = 2$

其意义是：可以期望在(613 ±20) N/mm^2 的区间包含了屈服强度 $R_{t0.5}$ 测量结果可能值的95%；在(709 ±5) N/mm^2 的区间包含了抗拉强度测量结果可能值的95%；在(31% －0.8%)至(31% +0.8%)的区间包含了断后伸长率A测量结果可能值的95%。如果以相对扩展不确定度的形式来报告，则可写为：

$R_{t0.5} = 613\ N/mm^2$，$U_{rel} = 3\%$，$k = 2$

$R_m = 709\ N/mm^2$，$U_{rel} = 1\%$，$k = 2$

$A = 31\%$，$U_{rel} = 3\%$，$k = 2$

通过不确定度的评定结果可以看出，屈服强度有较大的不确定度，主要由引伸计的误差所引入。要想降低屈服强度的不确定度，应该选用精度更好的引伸计进行检测。抗拉强度的不确定度很小，仅为1%。因为本试验中已经采用示值误差为0.5级的精度较好的试验机。伸长率不确定度主要由数值修约引入，建议通过多保留小数位数以降低伸长率的不确定度。

本文中，该钢屈服强度的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(R_{t0.5}) = 3\%$，建议厂内对于屈服强度的内控判定标准改成 $552 \times (1 + 3\%)\ MPa \leqslant R_{t0.5} \leqslant 655 \times (1 - 3\%)\ MPa$，以降低出厂产品质量异议的风险。

8 结论

(1) 抗拉强度的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(R_m) = 1\%$，主要影响因素为试验机力值的示值误差。

(2) 屈服强度的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(R_{t0.5}) = 3\%$，主要影响因素为引伸计的误差。

(3) 伸长率的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(A) = 3\%$，主要影响因素为数值修约。

(4) 测量结果要想降低不确定度，应该严格控制试验机的力值误差和引伸计的误差，采用0.5级以上的试验机和引伸计。

(5) 建议厂内对于该钢级屈服强度的内控判定标准改成 $552 \times (1 + 3\%)\ MPa \leqslant R_{t0.5} \leqslant 655 \times (1 - 3\%)\ MPa$，以降低出厂产品质量异议的风险。

参 考 文 献

[1] API SPEC5CT:2012，套管和油管规范[S].

[2] ASTM A370—18，钢制品力学性能试验的标准试验方法和定义[S].

[3] JJF1059—2012，测量不确定度评定与表示[S].

[4] 魏昊. 材料理化检验测量不确定度评估指南及实例[M]. 北京：中国计量出版社，2007.

[5] ASTM E83—2016，引伸计系统的校准和分级系统校准规范[S].