

方大特钢科技股份有限公司检测中心

测量不确定度分析记录

编号: R/JC 7.6-01

使用单位: 方大特钢科技股份有限公司检测中心

项目名称: 钢筋混凝土用钢筋拉伸试验不确定度评定

分析人: 树年华

审核人: 祝小冬

时 间: 2022.3.20

钢筋混凝土用钢筋拉伸试验不确定度评定

1 概述

1.1 被测对象：螺纹钢 HRB400E，试样标称直径为 14mm，检测其屈服强度、抗拉强度和断后伸长率。

1.2 引用文件

JJF 1059.1—2017 《测量不确定度评定与表示》

JJG 139—2014 《拉力、压力和万能试验机检定规程》

GB/T 28900—2012 《钢筋混凝土用钢材试验方法》

JJG 144—2007 《标准测力仪检定规程》

GB/T 12160—2019 《金属材料 单轴试验用引伸计系统的标定》

ISO 6892-1:2016 《Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature》

1.3 环境条件

室温要求 10℃～35℃，本试验温度 26℃

1.4 测量设备

SHT4305 电液伺服 300kN 拉伸试验机，试验机为 1.0 级准确度。

1.5 测量过程

用螺纹钢 HRB400E，Φ 14mm，标距 70mm 的标准试样，使用 SHT4305 电液伺服 300kN 拉伸试验机进行试验，按照 GB/T 28900—2012 《钢筋混凝土用钢材试验方法》标准进行试验。使用 10 个试样，得到测量列。

2 建立测量过程的数学模型

抗拉强度数学模型： $R_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{4F_m}{\pi d^2}$

式中： R_m — 抗拉强度；

F_m — 最大力；

S_0 — 试样平行长度原始横截面积；

D — 试样平行长度的直径

屈服强度数学模型： $R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} = \frac{4F_{eL}}{\pi d^2}$

式中： R_{eL} — 下屈服强度；

F_{eL} — 下屈服力;
 S_0 — 试样平行长度原始横截面积;
 d — 试样平行长度的直径

断后伸长率数学模型: $A = \frac{L_u - L_0}{L_0}$

式中: A — 断后伸长率;

L_0 — 原始标距;

L_u — 断后标距。

3 不确定度来源分析

3.1 抗拉强度

3.1.1 测量重复性引起的标准不确定度分项 $u(rep)$;

3.1.2 最大力 F_m 的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(F_m)$;

3.1.3 修约带来的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(off)$ 。

3.2 屈服强度

3.2.1 测量重复性引起的标准不确定度分项 $u(rep)$;

3.2.2 最大力 F_m 的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(F_m)$;

3.2.3 修约带来的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(off)$ 。

3.3 断后伸长率

3.3.1 测量重复性引起的标准不确定度分项 $u(rep)$;

3.3.2 原始标距的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(L_0)$;

3.3.3 断后伸长的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(\Delta L)$;

3.3.4 修约带来的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(off)$

4 输入量的标准不确定度评定

4.1 对试样进行测量重复性引起的标准不确定度分项 $u(rep)$ 的评定

使用 10 个试样, 得到测量列, 测量得到的结果见表 1。其测量的特殊性是同一点不可能重复测量,

所以测量包含了试样均匀度的影响。因此，要求有性能稳定的试样，是进行不确定度评定的先决条件。
采用 A 类方法进行评定。

表 1. 重复性试验测量结果

序号	试样直径 d mm	抗拉强度 R_m N/mm^2	下屈服强度 R_{eL} N/mm^2	断后伸长率 A %
1	14	630.1	453.1	34.2
2	14	637.1	454.6	33.8
3	14	633.5	445.7	31.5
4	14	635.4	456.3	32.4
5	14	633.6	456.4	32.6
6	14	635.7	457.2	33.7
7	14	663.1	454.3	31.6
8	14	634.8	452.9	33.3
9	14	634.1	455.4	34.2
10	14	633.8	448.3	33.8
平均值	14	637.12	453.42	33.11
标准偏差		8.83	3.52	0.97

测量重复性的计算结果见表 2。

本例评定二个试样测量平均值的不确定度，故应除以 $\sqrt{2}$ 。

$$u(rep) = \frac{s_i}{\sqrt{2}}$$

表 2. 标准偏差及 $u(rep)$ 的计算结果

性能指标	抗拉强度 R_m MPa	下屈服强度 R_{eL} MPa	断后伸长率 A %
实验标准差 s_i	8.83	3.52	1.45
$u(rep)$	6.25	2.49	1.03
$u_{rel}(rep)$	0.980%	0.549%	2.065%

4.2 输入量 B 类、合成和扩展不确定度的评定

4.2.1 抗拉强度

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

$$u_{crel}(R_m) = \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}(F_m) + u_{rel}(off)}$$

式中：

R_m — 抗拉强度；

F_m — 最大力；

rep — 重复性；

off — 修约。

4.2.1.1 最大力 F_m 的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(F_m)$ 的评定

影响最大力的主要因素是试验机测力系统示值误差带来的不确定度，其次是标准测力仪的不确定度和计算机数据采集系统带来的不确定度。认为室温温度带来的影响不大，其影响可以忽略不计。通过改变应变速率试验，在标准允许范围内未发现应变速率对此材料性能的显著影响。

(1) 试验机测力系统示值误差带来的相对标准不确定度 $u_{rel}(F_1)$

1.0 级的拉力试验机示值误差为 $\pm 1.0\%$ ，按均匀分布考虑 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_{rel}(F_1) = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.577\%$$

(2) 标准测力仪的相对标准不确定度 $u_{rel}(F_2)$

使用 0.3 级的标准测力仪对试验机进行检定。JJG 144 - 2007 中没有直接给出标准测力仪的不确定度和最大误差。而是给出了 $R = 0.3\%$ 。则其相对标准不确定度为：

$$u_{rel}(F_2) = \frac{R}{2.83} = \frac{0.3\%}{2.83} = 0.106\%$$

最大力的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(F_m)$

$$u_{rel}(F_m) = \sqrt{u_{rel}^2(F_1) + u_{rel}^2(F_2)} = \sqrt{0.577\%^2 + 0.106\%^2} = 0.654\%$$

4.2.1.2 修约带来的相对标准不确定度分项

根据 GB/T 228.1-2010 标准中规定，在 $>200\text{MPa} \sim 1000\text{MPa}$ 数值范围中，修约间隔 5MPa。在抗拉强度 637.12MPa 水平，按均匀分布，修约带来的相对标准不确定度分项：

$$u_{rel}(off) = \frac{5/637.12}{2\sqrt{3}} = 0.227\%$$

4.2.1.3 抗拉强度的相对合成不确定度

抗拉强度的相对标准不确定度分项汇总见表 3。

表 3 抗拉强度的相对标准不确定度分项汇总

标准不确定度分项	不确定度来源	相对标准不确定度
$u_{rel}(rep)$	测量重复性	0.980%
$u_{rel}(F_m)$	最大力	0.654%
$u_{rel}(off)$	修约	0.227%

相对合成不确定度:

$$u_{crel}(R_m) = \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(F_m) + u_{rel}^2(off)} = 1.20\%$$

4.2.1.4 抗拉强度的相对扩展不确定度

取置信概率 $p = 95\%$ ，按 $k_p = 2$

相对扩展不确定度 $U_{95rel}(R_m) = k_p \cdot u_{crel}(R_m)$

$$U_{95rel}(R_m) = 2 \times 1.20\% = 2.40\%$$

4.2.2 下屈服强度

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$$

$$u_{crel}(R_{eL}) = \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(F_{eL}) + u_{rel}^2(off)}$$

式中:

R_{eL} — 下屈服强度;

F_{eL} — 下屈服力;

rep — 重复性;

off — 修约。

4.2.2.1 下屈服力 F_{eL} 的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(F_{eL})$ 的评定

影响下屈服力的主要因素是试验机测力系统示值误差带来的不确定度,其次是标准测力仪的不确定度和模拟式显示装置的分辨力带来的不确定度。通过改变应变速率试验,在标准允许范围内未发现应变速率对此材料性能的显著影响。下屈服力 F_{eL} 的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(F_{eL})$ 的评定与最大力 F_m 的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(F_m)$ 的评定步骤相同。

$$u_{rel}(F_{eL}) = \sqrt{u_{rel}^2(F_1) + u_{rel}^2(F_2)} = \sqrt{0.577\%^2 + 0.106\%^2} = 0.654\%$$

4.2.2.2 修约带来的相对标准不确定度分项

根据 GB/T 228.1 - 2010 标准中规定, 在 $>200\text{MPa} \sim 1000\text{MPa}$ 数值范围中, 修约间隔 5MPa 。
在屈服强度 453.42MPa 水平, 按均匀分布, 修约带来的相对标准不确定度分项:

$$u_{\text{rel}}(\text{off}) = \frac{5/\sqrt{453.42}}{2\sqrt{3}} = 0.318\%$$

4.2.2.4 下屈服强度的相对合成不确定度

下屈服强度的相对标准不确定度分项汇总见表 4。

表 4 下屈服强度的相对标准不确定度分项汇总

标准不确定度分项	不确定度来源	相对标准不确定度
$u_{\text{rel}}(\text{rep})$	测量重复性	0.549%
$u_{\text{rel}}(F_{\text{eL}})$	下屈服力	0.654%
$u_{\text{rel}}(\text{off})$	修约	0.318%

相对合成不确定度:

$$u_{\text{crel}}(R_{\text{el}}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\text{rep}) + u_{\text{rel}}^2(F_{\text{eL}}) + u_{\text{rel}}^2(\text{off})} = 0.91\%$$

4.2.2.5 下屈服强度的相对扩展不确定度

取置信概率 $p = 95\%$, 按 $k_p = 2$

$$\text{相对扩展不确定度 } U_{95\text{rel}}(R_{\text{eL}}) = k_p \times u_{\text{crel}}(R_{\text{eL}})$$

$$U_{95\text{rel}}(\text{Rel}) = 2 \times 0.91\% = 1.82\%$$

4.2.3 断后伸长率

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

式中:

A — 断后伸长率;

L_0 — 原始标距;

L_u — 断后标距。

GB/T 228.1 - 2010 标准中规定, 原始标距的标记 L_0 应准确到 $\pm 1\%$, L_u 的测量应准确到 $\pm 0.25\text{mm}$ 。

由于 L_0 与 L_u 两个量相关, 且相关系数接近 1, 如果 $L_0 = 50\text{mm}$ 可以相差到 0.5mm 显然与 L_u 的测量无法协调。GB/T 228.1 - 2010 是等效采用 ISO 6892:1998(E), 但在 ISO 6892:1998(E) 标准 11.1 中,

是规定断后伸长 $(L_u - L_0)$ 的测量应准确到 $\pm 0.25\text{mm}$ 。因此在不确定度评定中按国际标准考虑。在评定测量不确定度时公式应表达为：

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

此外，通过改变应变速率试验，在标准允许范围内未发现应变速率对此材料性能的显著影响。

虽然 L_u 与 L_0 相关程度很强，但 ΔL 与 L_0 彼此不相关，则：

$$u_{crel}(A) = \sqrt{u_{rel}^2(L_0) + u_{rel}^2(\Delta L) + u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(off)}$$

4.2.3.1 原始标距的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(L_0)$ 的评定

根据 GB/T 228.1 - 2010 标准 8 中规定，原始标距的标记 L_0 应准确到 $\pm 1\%$ ，用数显卡尺测量的示值误差为 $\pm 0.03\text{mm}$ ，对于 50mm 长的相对误差为 0.06%，与原始标距的允许偏差比，可以忽略。按均匀分布考虑 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_{rel}(L_0) = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.577\%$$

4.2.3.2 断后伸长的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(\Delta L)$ 的评定

按 ISO 6892:2016(E) 标准 11.1 中的规定， $(L_u - L_0)$ 的测量应准确到 $\pm 0.25\text{mm}$ 。本试验的平均伸长为 17.45mm，按均匀分布考虑 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_{rel}(\Delta L) = \frac{0.25}{17.45 \times \sqrt{3}} = 0.827\%$$

4.2.3.3 修约带来的相对标准不确定度分项 $u_{rel}(off)$

根据 GB/T 228.1 - 2010 标准 20 中规定，断后伸长率的修约间隔为 0.5%。在 34.9%水平，按均匀分布考虑，修约带来的相对标准不确定度分项：

$$u(off) = \frac{0.5\%}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0.144\%$$

$$u_{rel}(off) = \frac{0.144\%}{34.9\%} = 0.412\%$$

4.2.3.4 断后伸长率的相对合成不确定度

断后伸长率的相对标准不确定度分项汇总见表 6。

表 6 断后伸长率的标准不确定度分项汇总

标准不确定度分项	不确定度来源	相对标准不确定度
$u_{rel}(rep)$	测量重复性	2.065%
$u_{rel}(off)$	修约	0.412%
$u_{rel}(L_0)$	试样原始标距	0.577%
$u_{rel}(\Delta L)$	断后伸长	0.827%

相对合成不确定度:

$$u_{crel}(A) = \sqrt{u_{rel}^2(L_0) + u_{rel}^2(\Delta L) + u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(off)} = 2.33\%$$

4.2.3.5 断后伸长率的相对扩展不确定度

取置信概率 $p = 95\%$ ，按 $k_p = 2$

$$U_{95rel}(A) = K_p \times u_{crel}(A) = 2 \times 2.33\% = 4.67\%$$

4.2.4 相对扩展不确定度结果汇总

相对扩展不确定度结果见表 8。

表 8 相对扩展不确定度结果汇总

抗拉强度 $U_{95rel}(R_m)$	下屈服强度 $U_{95rel}(R_{eL})$	断后伸长率 $U_{95rel}(A)$
2.40%	1.82%	4.67%

5 合成不确定度

合成不确定度的计算结果见条款 4.2.1.4、4.2.2.4、4.2.3.4。

6 扩展不确定度

根据表 8 的相对扩展不确定度计算出来的扩展不确定度为

$$\begin{aligned} U_{95}(R_m) &= 637.12 \times 2.40\% \\ &= 15.3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{95}(R_{eL}) &= 436.4 \times 1.89\% \\ &= 8.3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{95}(A) &= 33.11 \times 4.67\% \\ &= 1.55 \end{aligned}$$

7 测量不确定度结果报告

利用 SHT4305 电液伺服 300kN 拉伸试验机测定拉伸性能的测量不确定度结果为：

性能	测定值
抗拉强度 U_{95} (R_m)	(637.1 ± 15.3) MPa, $k=2$
屈服强度 U_{95} (R_{eL})	(436.4 ± 8.3) MPa , $k=2$
断后伸长率 U_{95} (A)	(33.1 ± 1.6) % , $k=2$