

# 特钢棒材室温拉伸试验测量不确定度的评定

吴旭, 田玉伟, 王喆, 周嘉琦, 教滨, 宋赞奎

鞍钢集团本钢板材股份有限公司, 质检计量中心, 辽宁 本溪

收稿日期: 2023年4月30日; 录用日期: 2023年5月20日; 发布日期: 2023年5月31日

## 摘要

以国家标准GB/T 228.1-2021为基础, 分析了特钢棒材室温拉伸试验的测量不确定度的几种主要来源, 建立对应的数学模型, 根据模型进行评定。本文所使用的数学模型和对应评定方法为特钢棒材室温拉伸试验的测量不确定度评定提供了依据和参考。

## 关键词

特钢棒材, 拉伸试验, 测量不确定度

# Evaluation on Measurement Uncertainty of Tensile Test of Special Steel Metallic Materials at Room Temperature

Xu Wu, Yuwei Tian, Zhe Wang, Jiaqi Zhou, Bin Jiao, Zankui Song

Quality Inspection and Measurement Center, Anshan Steel Group Bengang Iron & Steel Co., Ltd.,  
Benxi Liaoning

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2023; published: May 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

Based on the national standard GB/T 228.1-2021, several main sources of measurement uncertainty in tensile test of special steel bar at room temperature were analyzed, corresponding mathematical models were established, and evaluation was carried out according to the models. The mathematical model and corresponding evaluation method used in this paper provide the basis and reference for evaluating the measurement uncertainty of the tensile test of special steel bar at room temperature.

## Keywords

### Special Steel Bar, Tensile Test, Measurement Uncertainty

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在评价金属材料力学机械性能的检验中，室温拉伸试验是一项重要试验方法，对材料的研究和评价也起着至关重要的作用。在特钢棒材的生产、使用、制造过程中室温拉伸试验结果是判定材料是否合格的重要依据[1]。测量不确定度评定一直是计量、检测等机构重视和研究的领域，也因其评定具有一定的困难而在业内受到广泛关注，2021年以来随着室温金属拉伸试验国家标准的更新，很多不确定度的评定已经不能适应新标准的要求，因此此时发表新标准下的不确定度评定方法，不仅能够客观的反映测量系统的可靠程度，对于现代特钢产品研究拉伸性能也具有重要借鉴意义。

本文依据《金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》[2] (GB/T 228.1-2021)，在国家标准要求的环境条件下，使用特钢棒材作为试样对象，计算横截面积  $S_0$ ，使用 INSTRON 电子拉伸试验机进行试验。最终采集试验机中下屈服强度  $R_{eL}$ ，规定塑性延伸强度  $R_{P0.2}$ ，抗拉强度  $R_m$ ，断后伸长率  $A$  的检验数据进行分析。本文以特钢棒材作为试验对象，研究金属材料室温拉伸试验的测量不确定度评定[3]。

## 2. 建立数学模型

试样为圆形横截面，评定室温拉伸试验测量不确定度的计算公式如下。

下屈服强度  $R_{eL}$  数学模型为：

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

屈服强度  $R_{P0.2}$  数学模型为：

$$R_{P0.2} = \frac{F_{P0.2}}{S_0}$$

抗拉强度  $R_m$  数学模型为：

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

断后伸长率  $A$  数学模型为：

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中： $S_0$  为原始横截面积， $\text{mm}^2$ ； $F_{eL}$  为下屈服力，N； $F_{P0.2}$  为屈服力值，N； $R_m$  为抗拉强度，MPa； $F_m$  为断裂过程中最大力，N； $A$  为断后伸长率； $L_u$  为断后标距，mm； $L_0$  为原始标距，mm。

## 3. 不确定度来源分析

室温拉伸试验不确定度来源主要有：1) 试样尺寸测量引入的不确定度；2) 重复性测量引入的不确定

度；3) 数值修约引入的不确定度等；4) 试验速率引入的不确定度；5) 测力系统示值误差引入的不确定度。本文测量不确定度的评定仅考虑主要来源[4]。

#### 4. 重复性试验

该实验使用 INSTRON 电子拉伸试验机，从被测试样中截取 10 根长度均为 450 mm 的试样作为测试对象，按规定的速率进行 10 次拉伸试验[5]，根据拉伸曲线在仪器中采集数据得到试样下屈服强度  $R_{eL}$ 、规定塑性延伸强度  $R_{p0.2}$ 、抗拉强度  $R_m$ 、断后伸长率  $A$ ，使用贝塞尔公式计算标准偏差[6]，重复性试验的测量结果见表 1。

**Table 1.** Measurement results of repeatability test

**表 1.** 重复性试验测量结果汇总

序号	试样横截面积 $S_0$ (mm <sup>2</sup> )	下屈服强度 $R_{eL}$ (Mpa)	规定塑性延伸 强度 $R_{p0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $R_m$ (MPa)	断后伸长 (mm)	断后伸长率 $A$ (%)
1	80.12	996	998	1141	7.98	15.96
2	78.38	997	999	1146	7.96	15.92
3	78.54	981	984	1139	8	16
4	78.22	988	992	1142	8.34	16.68
5	78.54	992	996	1147	8.56	17.12
6	78.54	981	984	1139	8.1	16.2
7	78.22	988	992	1142	8.24	16.48
8	80.12	996	998	1141	8.13	16.26
9	78.54	992	996	1147	8.26	16.52
10	78.38	997	999	1146	7.99	15.98
平均值	78.76	990.8	993.8	1143	8.16	16.31
标准偏差	0.73	6.16	5.75	3.19	0.19	0.389
相对标准偏差	0.92%	0.62%	0.58%	0.28%	2.33%	2.39%

#### 5. 测量不确定度的评定

##### 5.1. 下屈服强度测量不确定度评定

###### 5.1.1. A 类相对标准不确定度分量 $u_{rel}(rep)$ ：下屈服强度 $R_{eL}$ 重复性测量引入

$$u_{rel}(rep) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.62}{\sqrt{10}} = 0.196\%$$

###### 5.1.2. A 类相对标准不确定度分量 $u_{rel}(S_0)$ ：试样尺寸测量引入

$$u_{rel}(S_0) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.92}{\sqrt{10}} = 0.291\%$$

###### 5.1.3. B 类不确定度分量 $u_{rel}(F)$ ：测力系统示值误差引入

1) B 类相对标准不确定度  $u_{rel}(F_1)$ ：0.5 级拉伸试验机示值误差为  $\pm 0.5\%$ ，按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ ，则  $u_{rel}(F_1) = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.289\%$ 。

2) 试验机校准结果的不确定度  $U_{rel}(F_2) = 0.26\%$  ( $k = 2$ ), 得到:  $u_{rel}(F_2) = 0.13\%$ 。

3) B类相对标准不确定度  $u_{rel}(F_3)$ : 0.1级标准测力仪校准试验机则重复性  $r = 0.1\%$ , 可看做重复性极限取  $k = \sqrt{6}$ , 则  $u_{rel}(F_3) = \frac{a}{k} = \frac{0.1\%}{\sqrt{6}} = 0.041\%$ 。

4) B类相对标准不确定度  $u_{rel}(F_4)$ : 根据《万能试验机计算机数据采集系统评定》(JJF1103-2003 附录B), 计算机数据采集系统引入的相对标准不确定度  $u_{rel}(F_4) = 0.2 \times 10^{-2} = 0.2\%$ 。

5) 测力系统示值误差(最大力  $F_m$ )的相对标准不确定度分项合并为

$$\begin{aligned} u_{rel}(F) &= \sqrt{u_{rel}^2(F_1) + u_{rel}^2(F_2) + u_{rel}^2(F_3) + u_{rel}^2(F_4)} \\ &= \sqrt{0.289^2 + 0.13^2 + 0.041^2 + 0.2^2} \\ &= 0.377\% \end{aligned}$$

#### 5.1.4. B类相对标准不确定度 $u_{rel}(off)$ : 测量结果数据修约引入

根据《数值修约规则与极限数值的表示和判定》(GB/T8170),  $R_{eL}$ 需修约至 1 MPa, 按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ , 区间半宽 0.5 MPa, 则:  $U(d) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289$ ,  $u_{rel}(off) = \frac{0.289}{990.8} * 100\% = 0.029\%$ 。

#### 5.1.5. B类相对标准不确定度 $u_{rel}(R_{mv})$ : 实验速率影响引入

据表 1, 屈服强度最大相差 16 MPa, 因此拉伸速率对屈服强度的影响为  $\pm 8$  MPa, 按均匀分布考虑:  $U(R_{mv}) = \frac{8}{\sqrt{3}} = 4.624$  MPa,  $u_{rel}(R_{mv}) = \frac{4.624}{990.8} * 100\% = 0.467\%$ 。

**Table 2.** Summary table of relative standard uncertainty components of lower  $R_{eL}$  yield strength

**表 2.** 下屈服强度  $R_{eL}$  的各分量相对不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度分量	相对标准不确定度
重复性测量	$u_{rel}(rep)$	0.196%
尺寸测量	$u_{rel}(S_0)$	0.291%
测力系统示值误差	$u_{rel}(F)$	0.377%
测量结果数据修约	$u_{rel}(off)$	0.029%
拉伸速率影响	$u_{rel}(R_{mv})$	0.467%

根据表 2, 各项分量计算下屈服强度的相对标准不确定度:

$$\begin{aligned} u_{rel}(R_{eL}) &= \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(S_0) + u_{rel}^2(F_{eL}) + u_{rel}^2(off) + u_{rel}^2(R_{mv})} \\ &= \sqrt{(0.196\%)^2 + (0.291\%)^2 + (0.377\%)^2 + (0.029\%)^2 + (0.467\%)^2} \\ &= 0.585\% \end{aligned}$$

根据  $U_{rel}(R_{eL}) = k u_{rel}(R_{eL})$ , 取包含概率  $p = 95\%$  时  $k = 2$ , 则  $U_{rel}(R_{eL}) = 2 \times u_{rel}(R_{eL}) = 2 \times 0.585\% = 1.17\%$ 。

## 5.2. 屈服强度测量不确定度的评定

### 5.2.1. A类相对标准不确定度分量 $u_{rel}(rep)$ : 屈服强度 $R_{p0.2}$ 重复性测量引入

$$u_{rel}(rep) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.58}{\sqrt{10}} = 0.184\%$$

### 5.2.2. B 类相对标准不确定度 $u_{rel}(off)$ : 测量结果数据修约引入

根据《数值修约规则与极限数值的表示和判定》(GB/T8170),  $R_{p0.2}$  需修约至 1 MPa, 按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ , 区间半宽 0.5 MPa, 则:  $U(d) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289$ ,  $u_{rel}(off) = \frac{0.289}{993.8} * 100\% = 0.029\%$ 。

### 5.2.3. B 类相对标准不确定度 $u_{rel}(R_{mv})$ : 实验速率影响引入

据表 1, 屈服强度最大相差 15 MPa, 因此拉伸速率对屈服强度的影响为  $\pm 7.5$  MPa, 按均匀分布考虑:  $U(R_{mv}) = \frac{7.5}{\sqrt{3}} = 4.33$  MPa,  $u_{rel}(R_{mv}) = \frac{4.33}{993.8} * 100\% = 0.436\%$ 。

**Table 3.** Summary table of relative standard uncertainty components of  $R_{p0.2}$  yield strength

**表 3.** 屈服强度  $R_{p0.2}$  的各分量相对不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度分量	相对标准不确定度
尺寸测量	$u_{rel}(S_0)$	0.291%
测力系统示值误差	$u_{rel}(F)$	0.377%
测量结果数据修约	$u_{rel}(off)$	0.029%
拉伸速率影响	$u_{rel}(R_{mv})$	0.436%
重复性测量	$u_{rel}(rep)$	0.184%

根据表 3, 各项分量计算屈服强度的相对标准不确定度:

$$\begin{aligned} u_{rel}(R_{p0.2}) &= \sqrt{u_{rel}(rep)^2 + u_{rel}(S_0)^2 + u_{rel}(F_{eL})^2 + u_{rel}(off)^2 + u_{rel}(R_{mv})^2} \\ &= \sqrt{(0.184\%)^2 + (0.291\%)^2 + (0.377\%)^2 + (0.029\%)^2 + (0.436\%)^2} \\ &= 0.672\% \end{aligned}$$

根据  $U_{rel}(R_{p0.2}) = k u_{rel}(R_{p0.2})$ , 取包含概率  $p = 95\%$  时  $k = 2$ , 则  $U_{rel}(R_{p0.2}) = 2 \times u_{rel}(R_{p0.2}) = 2 \times 0.672\% = 1.34\%$ 。

## 5.3. 抗拉强度测量不确定度的评定

### 5.3.1. A 类相对标准不确定度分量 $u_{rel}(rep)$ : 抗拉强度重复性测量引入

$$u_{rel}(rep) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.28}{\sqrt{10}} = 0.089\%$$

### 5.3.2. B 类相对标准不确定度 $u_{rel}(off)$ : 测量结果数据修约引入

根据《数值修约规则与极限数值的表示和判定》(GB/T8170),  $R_m$  需修约至 1 MPa, 按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ , 区间半宽 0.5 MPa, 则  $U(d) = \frac{a}{k} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289$ ,  $u_{rel}(off) = \frac{0.289}{1143} * 100\% = 0.025\%$ 。

### 5.3.3. B 类相对标准不确定度 $u_{rel}(R_{mv})$ : 实验速率影响引入

据表 1, 抗拉强度最大相差 8 MPa, 因此拉伸速率对屈服强度的影响为  $\pm 4$  MPa, 按均匀分布考虑:  $U(R_{mv}) = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2.31$  MPa,  $u_{rel}(R_{mv}) = \frac{2.31}{1143} * 100\% = 0.202\%$ 。

**Table 4.** Summary table of relative standard uncertainty components for tensile strength  $R_m$   
**表 4.** 抗拉强度  $R_m$  的各分量相对不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度分量	相对标准不确定度
重复性测量	$u_{rel}(rep)$	0.089%
尺寸测量	$u_{rel}(S_0)$	0.291%
测力系统示值误差	$u_{rel}(F)$	0.377%
测量结果数据修约	$u_{rel}(off)$	0.025%
拉伸速率影响	$u_{rel}(R_{mv})$	0.202%

根据表 4, 各项分量计算抗拉强度的相对标准不确定度:

$$\begin{aligned} u_{rel}(R_m) &= \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(S_0) + u_{rel}^2(F) + u_{rel}^2(off) + u_{rel}^2(R_{mv})} \\ &= \sqrt{(0.089\%)^2 + (0.291\%)^2 + (0.377\%)^2 + (0.025\%)^2 + (0.202\%)^2} \\ &= 0.526\% \end{aligned}$$

根据  $U_{rel}(R_m) = k u_{rel}(R_m)$ , 取包含概率  $p = 95\%$  时  $k = 2$ , 则  $U_{rel}(R_m) = 2 \times u_{rel}(R_m) = 2 \times 0.526\% = 1.05\%$ 。

#### 5.4. 断后伸长率测量不确定度评定

##### 5.4.1. A 类相对标准不确定度分量 $u_{rel}(rep)$ : 重复性测量引入

$$u_{rel}(rep) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{2.39\%}{\sqrt{10}} = 0.756\%$$

##### 5.4.2. B 类相对标准不确定度分量 $u_{rel}(L_0)$ : 原始标距测量引入

据标准原始标距  $L_0$  应准确到  $\pm 1\%$ , 按照均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ ,  $u_{rel}(L_0) = \frac{1.0}{\sqrt{3}} = 0.577\%$ 。

##### 5.4.3. A 类相对标准不确定度分量 $u_{rel}(\Delta L)$ : 断后伸长率重复性测量引入

$$u_{rel}(\Delta L) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{2.33\%}{\sqrt{10}} = 0.737\%$$

##### 5.4.4. B 类相对标准不确定度 $u_{rel}(off)$ : 测量结果数据修约引入

根据《数值修约规则与极限数值的表示和判定》(GB/T8170), A 需修约至 0.5%, 按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ , 区间半宽 0.25%, 则  $U(d) = \frac{0.25}{\sqrt{3}} = 0.145$ ,  $u_{rel}(off) = \frac{0.145}{16.3} * 100\% = 0.0089\%$ 。

**Table 5.** Summary table of relative standard uncertainty components for percentage elongation after fracture  
**表 5.** 断后伸长率各分量相对不确定度汇总表

不确定度来源	标准不确定度分量	相对标准不确定度
测量重复性	$u_{rel}(rep)$	0.756%
原始标距测量重复性	$u_{rel}(L_0)$	0.577%
断后伸长的测量重复性	$u_{rel}(\Delta L)$	0.737%
测量结果数据修约	$u_{rel}(off)$	0.0089%

根据表 5, 各项分量计算断后伸长率的相对标准不确定度:

$$\begin{aligned} u_{rel}(R_m) &= \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(\Delta L) + u_{rel}^2(L_0) + u_{rel}^2(off)} \\ &= \sqrt{(0.756\%)^2 + (0.737\%)^2 + (0.577\%)^2 + (0.0089\%)^2} \\ &= 1.20\% \end{aligned}$$

根据  $U_{rel}(A) = k u_{rel}(A)$ , 取包含概率  $p = 95\%$  时  $k = 2$ , 则  $U_{rel}(A) = 2 \times u_{rel}(A) = 2 \times 1.20\% = 2.40\%$ 。

**Table 6.** Summary table of expanded uncertainty

**表 6.** 扩展不确定度汇总表

下屈服强度 $R_{eL}$ 测量 不确定度	屈服强度 $R_{p0.2}$ 测量 不确定度	抗拉强度 $R_m$ 测量 不确定度	断后伸长率 $A$ 测量 不确定度
$U(R_{eL})$	$U(R_{p0.2})$	$U(R_m)$	$U(A)$
1.17%	1.34%	1.05%	2.40%

## 6. 结束语

最终扩展不确定度汇总表见表 6。根据设定的模型分析不确定的来源, 通过计算发现来自于断后伸长率的测量不确定度最高, 屈服强度次之, 最后是抗拉强度, 说明该项试验对于抗拉强度检验的可靠度最高, 表明测量值的分散程度最小, 测量全过程可疑程度最小[7]。而在全部实验过程中越小的测量不确定度说明测量过程的水平越高, 测量结果的质量越高, 价值也越大。

当影响不确定度的分量发生变化时应重新进行测量不确定度的评定。也应根据客户要求提供对应试验项目的测量不确定度报告[8]。当前金属制造产业对于金属性能的要求越来越高, 这也使测量不确定度的评定与应用越来越重要, 也要求人们对于金属材料不断学习与深入认识。

## 参考文献

- [1] 赵永锋, 林小刚, 陈杰, 唐志刚. 材料理化检验测量不确定度评定方法的研究[J]. 理化检验(物理分册), 2018(54): 657-661.
- [2] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228. 1-2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [3] 全国法制计量管理计量技术委员会. 测量不确定度评定与表示: JJF1059. 1-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [4] 周璐. 微波功率参数测量不确定度的评定方法[J]. 信息科技·无线电电子学, 2023, 3(5): 67-71.
- [5] 王淑敏, 张宗飞, 卢文新. PBAT/PLA 复合材料拉伸强度测量不确定度的评定[J]. 工程科技, 2022, 41(4): 5-7+35.
- [6] 严互彬. 农业用聚乙烯吹塑棚膜拉伸强度测量不确定度的评定[J]. 工程科技, 2022, 22(4): 185-188.
- [7] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 69-138.
- [8] 陈东. 包装用聚乙烯吹塑薄膜拉伸强度不确定度的评定[J]. 包装与机械, 2018, 36(2): 71-72+29.