

# 基于小冲杆试验的 Inconel 718 合金测量不确定度分析

□张同林<sup>1</sup> 赵阳<sup>1</sup> 倪宏祥<sup>1</sup> 李海天<sup>2</sup> 时会强<sup>1</sup>

(1. 沈阳国仪检测技术有限公司 2. 华中农业大学经济管理学院)

**【摘要】**为了探究室温下小冲杆试验装置的不确定度。本文首先按照相关标准和测量不确定度评定程序，确定了Inconel 718合金材料拉伸试验不确定度来源。再依据小冲杆试验的原理和方法以及计算公式，建立数学模型。采用A类和B类不确定度评定方法，评定小冲杆试验装置合成不确定度。以95%的置信度评定了Inconel 718合金试样测量不确定度。结果表明，传统计算模型评定的屈服强度的相对扩展不确定为9.222%，抗拉强度的相对扩展不确定为7.152%，而新模型评定的屈服强度不确定度为7.410%。

**【关键词】**Inconel 718合金；小冲杆；合成不确定度；测量不确定度；力学性能

文献标识码：A

文章编号：1003-1870 (2024) 12-0021-05

## 引言

Inconel 718合金因其卓越的高温稳定性、耐腐蚀性和良好的可焊性，被认为是极端环境下管道和管件理想材料<sup>[1,2]</sup>。然而，管道系统长期在恶劣环境下工作，管道材料受到腐蚀和其他环境因素影响，导致材料性能发生变化，发生脆性断裂<sup>[3]</sup>。材料性能变化严重时会影响管道的安全性和使用寿命。因此，准确评估在恶劣环境中材料性能的变化显得尤为重要。

小冲杆试验是一种微小试样即可测试样品力学性能的方法<sup>[4]</sup>。与传统的破坏性测试方法相比，小冲杆试验所需的样品体积较小，对材料的损伤程度也较低，从而减少了对在役设备正常运行的影响，因此被认为在评估在役管道材料力学性能方面有着广泛的应用前景。

同时，对于微损试样而言，在检测过程中的不确定性对于结果的影响也是十分明显的。这些不确定性可能来源于测量设备自身精度、样品的制备产生的误差、设备工作环境以及操作者的操作水平等多种因素的影响。为了减少试验装置及试验过程对

结果的影响，通过计算其的不确定度，可以帮助试验人员识别和控制这些影响因素，从而确保试验结果的准确性和可重复性。因此，本文利用Inconel 718合金来评估小冲杆试验机的不确定度，以确定测量结果的置信区间和了解测量结果的可靠性。同时，为小冲杆试验装置的优化试验设计、改进测量方法和提高数据的精确性与重复性提供参考<sup>[5]</sup>。

## 1 检测因素影响不确定度分析

### 1.1 试验样品对检测结果的影响

取样的部位和样品的切割方式都会直接影响样品的位移-载荷曲线。同时，依据作者前期研究发现，晶粒大小、样品厚度也会对位移-载荷曲线造成影响。为保证数据的稳定性，在取样时应选择在同一批次、不同的管道上截取材料，且尽量选取管道中间位置的材料。同时利用显微镜观察晶粒大小，确保材料尺寸效应不会对结果产生影响。

### 1.2 测量设备对检测结果的影响

本论文选择TSE202A微机控制电子万能试验机为冲杆提供动力源，通过电磁阀控制载荷系统，能够更精准地进行应力控制。此外，测量力值在设备

量程的20%~80%之间，满足国家相关标准，保证了设备的精度。

### 1.3 操作方法对检测结果的影响

小冲杆试验过程中样品的摆放位置和加载速率都会影响检测结果。因此，样品圆心应与下夹具轴线保持一致。拉伸速率是压头下压过程中控制的重要参数，直接影响所得载荷值和位移值，因此本试验严格遵循《GB/T 29459.2 在役承压设备金属材料小冲杆试验方法第2部分》推荐的拉伸速率，拉伸机拉伸速率设置为0.5mm/min。

### 1.4 操作人员对检测结果的影响

操作人员在制备样品、尺寸控制、试验和数据处理过程中都可能会引入误差，增大试验的不确定度。为了降低人为因素导致的不确定性，试验人员全程按照试验标准和操作规程工作，严格按照数值修约规则进行修约。日常工作中也对万能试验机进行维护保养和周期检定，使其保持良好的工作状态。

## 2 小冲杆抗拉强度测量不确定度数学模型的建立

在室温下进行小冲杆试验，根据小冲杆试验原理、方法及各指标的计算公式建立数学模型，分析测量不确定来源，确定各指标的不确定度分量，依据相关标准和测量不确定度评定程序的要求，评定屈服强度、抗拉强度的测量不确定度。

根据不确定度的传播定律，合成标准不确定度由更分量的方差和协方差算出<sup>[6,7]</sup>。当各分量彼此独立不相关时，合成标准不确定度的方差可按公式(1)计算：

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

当各分量显著相关时，合成标准不确定度的方差按公式(2)(3)计算：

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

$$u_c(y) = \left| \sum_{i=1}^n c_i u(x_i) \right| = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right| \quad (3)$$

屈服强度按照公式(4)进行计算，单位为MPa。

$$R_{p0.2} = 0.5 \frac{P_y}{t^2} \quad (4)$$

屈服强度相对合成不确定度计算方法如公式(5)所示：

$$u_{rel}(R_{p0.2}) = \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(F_{p0.2}) + u_{rel}^2(t)} \quad (5)$$

抗拉强度依据公式(6)进行计算，单位为MPa。

$$R_m = 0.1 \frac{P_m}{t^2} - 7 \quad (6)$$

抗拉强度相对合成不确定度计算方法如公式(7)所示：

$$u_{rel}(R_{p0.2}) = \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(F_m) + u_{rel}^2(t)} \quad (7)$$

## 3 重复性试验

由于小冲杆试验和拉伸试验情况类似，均不能进行重复试验，因此，计算不确定度时应考虑试样均匀性对其的影响。本文采用同一批次，相同牌号和相同直径的10个试样进行试验，试验完成后利用公式(1)和(2)评定材料试样的屈服强度和抗拉强度平均结果的A类标准不确定度。用贝塞尔公式计算试验标准偏差，计算结果见表1。

表1 重复性试验测量结果

试样编号	试样直径t/mm	经典模型计算的屈服强度MPa	经典模型计算的抗拉强度MPa	新模型计算的屈服强度/MPa	新模型计算的抗拉强度/MPa
1	5.001	637.505	1240.891	635.0038	1312.480962
2	4.994	689.915	1165.815	674.8354	1230.46424
3	5.010	732.776	1150.580	707.40976	1214.107828
4	5.000	629.01	1271.200	628.5476	1345.528836
5	5.014	659.076	1213.055	651.39776	1282.327876
6	4.968	663.155	1175.174	654.4978	1240.240284

续表

试样编号	试样直径t/mm	经典模型计算的屈服强度MPa	经典模型计算的抗拉强度MPa	新模型计算的屈服强度/MPa	新模型计算的抗拉强度/MPa
7	5.030	716.266	1209.505	694.86216	1278.7156
8	4.983	666.491	1276.295	657.03316	1350.805185
9	5.044	677.998	1225.429	665.77848	1296.3131
10	4.977	708.237	1289.402	688.76012	1365.00357
极差	0.076	103.766	138.822	78.862	150.896
平均值	5.002	678.043	1221.735	665.813	1291.599
绝对标准差	0.02	33.78	48.27	25.68	52.59
相对标准差	0.47%	4.98%	3.95%	3.86%	4.07%

#### 4 测量不确定度的评定

##### 4.1 屈服强度测量不确定度评定

###### 4.1.1 A类相对标准不确定度的评定

评定10个试样的测量不确定度，计算结果为：

$$U_{rel}(rep) = \frac{S}{\sqrt{3}} = \frac{1.71\%}{\sqrt{3}} = 0.987\%$$

###### 4.1.2 规定塑性延伸力 $F_{0.2}$ 的B类相对标准不确定度的评定

(1) TSE202A 微机控制电子万能试验机示值误差带来的不确定度分量 $u_{rel}(F_1)$

1级拉伸试验机系统示值误差为 $\pm 0.1$ ，按均匀分布考虑 $k = \sqrt{3}$ ，即 $U_{rel}(F_1) = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.577\%$ 。

###### (2) 标准力传感器的相对不确定度 $u_{rel}(F_2)$

校准证书中认定的标准测力仪为0.1级，重复性 $r=0.1\%$ ，认为此时的测力计是重复性极限。因此标准测力仪校准试验机引入的相对不确定度为：

$$U_{rel}(F_2) = \frac{r}{2.83} = \frac{0.1\%}{2.83} = 0.035\%$$

###### (3) 规定塑性延伸力的标准不确定度 ( $F_2$ )

$$U_{rel}(F_{p0.2}) = \sqrt{u_{rel}^2(F) + u_{rel}^2(F_2)} = \sqrt{0.987\%^2 + 0.035\%^2} = 0.988\%$$

###### 4.1.3 样品厚度的B类相对标准不确定度的评定

测试样品厚度时，每个试样的尺寸应测量均精确到 $\pm 0.5\%$ ，因此 $u_{rel}(d_0) = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.289\%$ 。

###### 4.1.4 拉伸速率带来的不确定度

万能试验机拉伸速率在《GB/T 29459.2 在役承压设备金属材料小冲杆试验方法第2部分》室温下拉伸性能的试验方法规定的范围内，屈服强度最大相差103MPa，因此速率对屈服强度的影响为 $\pm 51.5\text{MPa}$ ，

按均匀分布考虑， $u(R_{mV}) = \frac{51.5}{\sqrt{3}} = 29.734$ ；

$$u_{rel}(R_{mV}) = \frac{29.734}{678.043} = 4.385\%$$

###### 4.1.5 屈服强度的相对合成不确定度

屈服强度的相对合成不确定度如表2所示。规定塑性延伸强度的相对合成不确定度为：

$$u_{crel}(R_{p0.2}) = \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(F_{p0.2}) + u_{rel}^2(S_0) + u_{rel}^2(R_{p0.2})} \\ = \sqrt{0.987\%^2 + 0.988\%^2 + 0.289\%^2 + 4.385\%^2} = 4.611\%$$

表2 屈服强度的相对合成不确定度分量汇总

标准不确定度分量	不确定度来源	相对标准不确定度/(%)
$u_{rel}(rep)$	测量重复性	0.987%
$u_{rel}(F_{p0.2})$	规定塑性延伸力	0.988%
$u_{rel}(d_0)$	样品厚度	0.289%
$u_{rel}(R_{mV})$	拉伸速率	4.385%

###### 4.1.6 屈服强度的相对扩展不确定度

取包含概率 $p=95\%$ ，包含因子 $k=2$ ， $U_{rel}(R_{p0.2}) = k \times u_{rel}(R_{p0.2}) = 2 \times 4.611\% = 9.222\%$ 。

#### 4.2 抗拉强度测量不确定度评定

##### 4.2.1 A类相对标准不确定度的评定

评定10个试样的测量不确定度的计算结果为：

$$U_{rel}(rep) = \frac{S}{\sqrt{3}} = \frac{1.71\%}{\sqrt{3}} = 0.987\%$$

##### 4.2.2 最大载荷 $F_m$ 的B类相对标准不确定度的评定

(1) TSE-202A 微机控制电子万能试验机示值误差带来的不确定度分量 $u_{rel}(F_1)$ 1级拉伸试验机系统

示值误差为  $\pm 0.1$ ，按均匀分布考虑  $k = \sqrt{3}$ ，即：

$$U_{\text{rel}}(F_1) = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.577\%$$

(2) 标准力传感器的相对不确定度  $u_{\text{rel}}(F_2)$

校准证书中认定的标准测力仪为0.1级，重复性  $r=0.1\%$ ，认为此时的测力计是重复性极限。因此，标准测力仪校准试验机引入的相对不确定度为：

$$U_{\text{rel}}(F_2) = \frac{r}{2.83} = \frac{0.1\%}{2.83} = 0.035\%$$

(3) 规定最大力的相对标准不确定度  $u_{\text{rel}}(F_{\text{rel}})$

$$u_{\text{rel}}(F_{\text{P}0.2}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(F) + u_{\text{rel}}^2(F_2)} = \sqrt{0.987\%^2 + 0.035\%^2} = 0.988\%$$

4.2.3 样品厚度的B类相对标准不确定度的评定

测试样品厚度时，每个试样的尺寸应测量均精

确到  $\pm 0.5\%$ ，因此  $u_{\text{rel}}(d_0) = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.289\%$

4.2.4 拉伸速率带来的不确定度

万能试验机拉伸速率在《GB/T 29459.2 在役承压设备金属材料小冲杆试验方法第2部分》：室温下拉伸性能的试验方法规定的范围内，屈服强度最大相差138.822MPa，因此，速率对屈服强度的影响为  $\pm 69.411\text{MPa}$ ，按均匀分布考虑：

$$u(R_{\text{mV}}) = \frac{69.411}{\sqrt{3}} = 40.074; \quad u_{\text{rel}}(R_{\text{mV}}) = \frac{40.074}{1221.375} = 3.280\%$$

4.2.5 抗拉强度的相对合成不确定度

抗拉强度的相对合成不确定度如表3所示。规定塑性延伸强度的相对合成不确定度为：

表3 抗拉强度的相对合成不确定度分量汇总

标准不确定度分量	不确定度来源	相对标准不确定度 $l(\%)$
$u_{\text{rel}}(\text{rep})$	测量重复性	0.987%
$u_{\text{rel}}(F_{\text{P}0.2})$	规定最大延伸力	0.988%
$u_{\text{rel}}(d_0)$	样品厚度	0.289%
$u_{\text{rel}}(R_{\text{mV}})$	拉伸速率	3.280%

$$u_{\text{crel}}(R_{\text{P}0.2}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\text{rep}) + u_{\text{rel}}^2(F_{\text{P}0.2}) + u_{\text{rel}}^2(S_0) + u_{\text{rel}}^2(R_{\text{P}0.2})} \\ = \sqrt{0.987\%^2 + 0.988\%^2 + 0.289\%^2 + 3.280\%^2} = 3.576\%$$

4.2.6 抗拉强度的相对扩展不确定度

取包含概率  $p=95\%$ ，包含因子  $k=2$ ， $U_{\text{rel}}(R_{\text{P}0.2}) = k \times u_{\text{rel}}(R_{\text{P}0.2}) = 2 \times 3.576\% = 7.152\%$ 。

4.3 使用新数学模型评定不确定度

由4.1.6和的结果可知，采用传统模型评定的不确定度较大，有时无法满足实际生产需要。因此，本文作者对718镍基合金的屈服强度和抗拉强度的小冲杆模型进行了修正，修正后的新数学模型如公式(8)和公式(9)所示，表4为新模型重复性试验测量结果：

$$R_{\text{P}0.2} = 0.38 \frac{P_y}{t^2} + 150.5 \quad (8)$$

表4 新模型重复性试验测量结果

试样编号	试样直径 $t/\text{mm}$	新模型计算的屈服强度/MPa
1	5.001	635.0038
2	4.994	674.8354
3	5.010	707.40976
4	5.000	628.5476
5	5.014	651.39776
6	4.968	654.4978
7	5.030	694.86216
8	4.983	657.03316
9	5.044	665.77848
10	4.977	688.76012
极差	0.076	78.862
平均值	5.002	665.813
绝对标准差	0.02	25.68
相对标准差	0.47%	3.86%

与4.1节计算方法类似,新模型评定的屈服强度的相对扩展不确定度为7.41%,与传统模型相比降低了不确定度,说明使用该模型评定镍基合金的屈服强度的相对扩展不确定度是有效的。

## 5 结语

本文通过Inonel 718 试样拉伸试验,评定了小冲杆试验装置的屈服强度和抗拉强度的不确定度,分析了影响不确定度的检测因素,并利用数学模型计算了2个力学性能的不确定度。结果表明,传统计算模型评定的屈服强度的相对扩展不确定度为9.222%,抗拉强度的相对扩展不确定度为7.152%,而新模型评定的屈服强度不确定度为7.410%。

从上述评定过程可以看出,建立正确的数学模型,对于测量不确定度的评定至关重要。通过分析数学模型中各个参数可能对结果产生的不确定度来源,并对这些不确定度分量进行评估,最后将所有参数的不确定度分量(包括A类不确定度分量)进行合成,就可以计算出在指定包含概率下金属材料微小试样拉伸试验结果的测量不确定度。

此外,在人员、设备、方法和环境等条件受控的情况下,小冲杆试验的测量不确定度评定结果,可以直接应用于日常检测工作,不需要每次测试都重新评定。如果条件发生变化,则应重新进行评定。采用与本文相同等级的试验机和标准测力仪进行小冲杆试样室温拉伸试验时,试验机的计算机数据采集系统所带来的不确定度分量已经包含在试验机的力值测量不确定度中,因此无需再单独考虑<sup>[8-10]</sup>。

## 参考文献

- [1] 张旻,马川川,薛春.不同热处理下析出相和晶粒尺寸对Inconel 718 高温合金力学性能的影响(英文)[J].稀有金属材料与工程,2024,53(08):2131-6.
- [2] 徐振阳.激光熔覆制备Inconel 718 涂层及性能研究[D],2023.
- [3] 李佳骏,倪宏祥,张同林.疲劳试验对GIS 波纹管补偿器材料显微组织的影响[J].管道技术与设备,2024,(03):54-7.
- [4] 陈国耀,徐彤,钟继如.小冲杆和压入测试技术获取材料真应力-应变曲线的对比研究[J].压力容器,2022,39(09):42-9+55.

- [5] 李晓旭,王俊东,冯波.弹性元件集中力刚度试验的不确定度评定[J].管道技术与设备,2020,(05):23-4+62.

- [6] 江苏省计量科学研究所,中国计量科学研究院,北京理工大学,国家质量监督检验检疫总局计量司.测量不确定度评定与表示[Z].国家质量监督检验检疫总局.2012:68

- [7] 中国合格评定国家认可中心,中国计量科学研究院,天津出入境检验检疫局.测量不确定度评定和表示[Z].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会.2017:84

- [8] 侯飞.探究金属材料力学性能测试中存在的 uncertainty [J].世界有色金属,2023,(20):211-3.

- [9] 王俊,王玉玲.金属材料力学性能测试不确定度评定的探讨[J].理化检验(物理分册),2014,50(11):818-21.

- [10] 张仲武.金属材料力学性能测试中存在的 uncertainty 分析[J].工程技术研究,2023,8(22):122-4.

## 作者简介

张同林(1997—),女,硕士,助工,毕业于南京航空航天大学。现就职于沈阳国仪检测技术有限公司,从事材料检测技术研究工作。