

# 显微维氏硬度机 不确定度评定报告

(征求意见稿)

起草：显微维氏硬度计量器具检定系统表起草组

审查：全国力值硬度重力计量技术委员会

# 显微维氏硬度机不确定度评定报告

## 1、前言

本文包括显微维氏硬度基准机、显微维氏硬度标准机和显微维氏硬度工作硬度计的不确定度评定。

显微维氏硬度机的不确定评定有两种方法，直接法和间接法。直接法是通过影响显微维氏硬度的各有关参量进行直接测量，分别评定有关参量的不确定度，进而合成得到显微维氏硬度机的测量不确定度。各参量主要包括试验力、压痕测量、压头角度和压头横刃。基准机的测量不确定度采用直接法进行评定。间接法以量值传递为基础，根据上一级仪器的不确定度和测量结果的重复性等因素引入的不确定度合成得到。

## 2、不确定度评定

### 2.1 基准机的不确定度评定

#### 2.1.1 测量模型

通常所说的显微硬度试验即显微维氏硬度试验是采用两相对面夹角为  $136^\circ$  的金刚石正四棱锥压头，在小于或等于 1kg 的某确定负荷下，以一定速度压入被测物表面并保持一段时间后卸除负荷的试验方法。其硬度值以所得压痕表面积上承受的平均压力计算，公式如下：

$$HV = 0.102 \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

式中： $HV$ ——显微维氏硬度值；

$F$ ——作用在压头上的负荷力(N)；

$S$ ——压痕表面积( $\text{mm}^2$ )；

$\alpha$ ——压头两相对面夹角， $136^\circ$ ；

$d$ ——压痕对角线的平均长度(mm)。

根据式(1)所示的测量模型，可以通过求取硬度值的偏微分 $\partial HV/HV$ 获得试验力 $F$ 、压痕对角线长度 $d$ 和显微维氏压头相对面夹角 $\alpha$ 三个影响量的灵敏系数，如表 1 所示。此外，表中还列出了横刃长度 $c$ 引入的不确定度分量。

表 1 显微维氏硬度机不确定度计算表

影响量	偏微分形式	不确定度分配 ( $\Delta HV/HV$ )	不确定度符号
试验力 $F$	$\frac{\partial HV}{\partial F} = \frac{HV}{F}$	$\frac{\Delta F}{F}$	$u(F)$
压痕对角线长度 $d$	$\frac{\partial HV}{\partial d} = -2 \frac{HV}{d}$	$-2 \frac{\Delta d}{d}$	$u(d)$

压头夹角 $\alpha$	$\frac{\partial HV}{\partial \alpha} = \frac{HV}{2 \tan(\alpha/2)} \frac{\pi}{180}$	$\frac{\Delta \alpha}{2 \tan(\alpha/2)} \frac{\pi}{180}$	$u(\alpha)$
压头顶部横刃 $c$	$\frac{\partial HV}{\partial c} = \frac{\sqrt{2} HV}{d}$	$\sqrt{2} \frac{\Delta c}{d}$	$u(c)$

下面以(700~800)HV1 为例，计算各分量引起的不确定度和合成不确定度。

### 2.1.2 试验力引起的不确定度分量

试验力施加系统通过力传感器进行以 3 次为一组的大量多组测量，得到其平均值的最大测量误差限为 0.02%。将试验力相对于标称试验力的分布看作矩形分布，有：

$$u(F_{HTM}) = \frac{0.02\%}{\sqrt{3}} = 1.2\% \quad (2)$$

将其合成力传感器的不确定度，得表 2。

表 2 使用力传感器测量的试验力不确定度计算

相关量 $X_i$	估计值 $x_i$	分布类型	相对标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 $c_i$	相对不确定度贡献 $u_{rel}(H)$
$F_{RS}$	1.96164 mV/V	正态	3.00E-04	1	3.00E-04
$u(F_{HTM})$	1.96164 mV/V	矩形	1.15E-04	1	1.15E-04
合成相对标准不确定度 $u(F)$					3.30E-04

### 2.1.3 长度测量引起的不确定度分量

压痕测量装置通过标准刻线尺进行以 3 次为一组的大量多组测量，得到其平均值的最大测量误差限为 0.2 $\mu$ m。将测量的长度间隔相对于标准长度间隔的分布看作矩形分布，有：

$$u(L_{HTM}) = \frac{0.2}{49.8 \times \sqrt{3}} = 0.23\% \quad (3)$$

将其合成标准刻线尺的不确定度，得表 3。

表 3 测量设备的不确定度计算

相关量 $X_i$	估计值 $x_i$	分布类型	相对标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 $c_i$	相对不确定度贡献 $u_{rel}(H)$
$L_{RS}$	49.8 $\mu$ m	正态	1.00E-03	1	1.00E-03
$u(L_{HTM})$	49.8 $\mu$ m	矩形	2.32E-03	1	2.32E-03
合成相对标准不确定度 $u(L)$					2.53E-03

### 2.1.4 压头参数引起的不确定度分量

由于所挑选的压头角度测量结果可以认为在实际值附近 $\pm 0.03^\circ$ 的范围内呈矩形分

布,  $u(\alpha) = 0.02^\circ$ ; 横刃测量结果可以认为在 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 范围内呈矩形分布,  $u(c) = 0.23\mu\text{m}$ 可计算得到如下的偏微分形式:

$$\left(\frac{\partial HV}{\partial HV}\right)_\alpha = \frac{u(\alpha)}{2 \tan(\alpha/2)} = 0.000071 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial HV}{\partial HV}\right)_c = \sqrt{2} \frac{u(c)}{d} = 0.0066 \quad (5)$$

### 2.1.5 显微维氏硬度基准机不确定度合成

将上述各影响量汇总, 合成不确定度如表 4 所示。

表 4 基准机不确定度合成表 ((700-800)HV1 为例)

影响量 $X_i$	相对总微分 $\left(\frac{\partial HV}{\partial HV}\right)_i$
试验力 $F$	0.00033
压痕对角线长度 $L$	0.00505
压头夹角 $\alpha$	0.000071
压头顶部横刃 $c$	0.0066
合成相对不确定度 $u_{rel}(H),\%$	0.8
相对扩展不确定度 $U_{rel}(H)(k=2),\%$	1.7
扩展不确定度 $U(H)(k=2),\text{HV}$	14

### 2.1.6 典型标尺典型值处的不确定度评定结果

典型标尺典型值处的测量不确定度评定结果如表 5 所示。根据标准硬度块均匀度的指标要求, 较好情况下能达到指标要求的一半, 则可以得到不同标尺典型值处的校准和测量能力。显微维氏硬度基准机的相对扩展不确定度指标达到 2.0%-5.0% ( $k=2$ )。

表 5 基准机典型标尺典型值处的不确定度和最佳测量能力

标尺及范围	相对扩展不确定度 $U_{rel}(H)(k=2),\%$	相对扩展不确定度 $U(H)(k=2),\text{HV}$	校准和测量能力 $U(H)(k=2),\%$
(200~300)HV0.05	4.2	13	4.3
(400~500)HV0.05	4.4	22	4.5
(700~800)HV0.05	4.6	37	4.7
(200~300)HV0.1	2.8	8.4	2.9
(400~500)HV0.1	4.2	21	4.3
(700~800)HV0.1	4.2	33	4.3
(200~300)HV0.2	2.1	6.3	2.3
(400~500)HV0.2	2.8	14	2.9
(700~800)HV0.2	4.2	33	4.3
(200~300)HV0.3	1.7	5.0	1.9
(400~500)HV0.3	2.1	11	2.2
(700~800)HV0.3	2.8	22	2.9

(200~300)HV0.5	1.4	4.2	1.6
(400~500)HV0.5	1.7	8.3	1.8
(700~800)HV0.5	2.1	17	2.2
(200~300)HV1	1.1	3.1	1.3
(400~500)HV1	1.4	6.9	1.5
(700~800)HV1	1.7	14	1.8

## 2.2 标准机的不确定度评定

标准机可以按照直接法参考基准机进行不确定度评定，根据规程规定的标准机各分量的最大允许误差进行评估，以(700-800)HV1为例可得表6。

表6 标准机不确定度合成表（(700-800)HV1为例）

影响量 $X_i$	相对总微分 $(\frac{\partial HV}{HV})_i$
试验力 $F$	0.00065
压痕对角线长度 $L$	0.00612
压头夹角 $\alpha$	0.000071
压头顶部横刃 $c$	0.0082
合成相对不确定度 $u_{rel}(H),\%$	1.1
相对扩展不确定度 $U_{rel}(H)(k=2),\%$	2.1
扩展不确定度 $U(H)(k=2),HV$	17

标准机典型标尺典型值处的测量不确定度评定结果如表7所示。显微维氏硬度标准机的相对扩展不确定度指标达到2.5%-6.0%（ $k=2$ ）。

表7 标准机典型标尺典型值处的不确定度

标尺及范围	相对扩展不确定度 $U_{rel}(H)(k=2),\%$	扩展不确定度 $U(H)(k=2),HV$
(200~300)HV0.05	5.2	16
(400~500)HV0.05	5.4	27
(700~800)HV0.05	5.7	46
(200~300)HV0.1	3.5	11
(400~500)HV0.1	5.2	26
(700~800)HV0.1	5.2	42
(200~300)HV0.2	2.7	7.9
(400~500)HV0.2	3.5	17
(700~800)HV0.2	5.2	42
(200~300)HV0.3	2.1	6.2
(400~500)HV0.3	2.6	13
(700~800)HV0.3	3.4	28
(200~300)HV0.5	1.7	5.2
(400~500)HV0.5	2.1	11

(700~800)HV0.5	2.6	21
(200~300)HV1	1.3	3.9
(400~500)HV1	1.7	8.6
(700~800)HV1	2.1	17

此外，显微维氏硬度标准机也可以根据间接法评定，相对标准不确定度 $u_{rel}$ 和相对扩展不确定度 $U_{rel}$ 分别由式 6 和式 7 得到：

$$u_{rel} = \sqrt{u_{CRM}^2 + u_x^2 + u_s^2} \quad (6)$$

$$U_{rel} = k \cdot u_{rel} \quad (7)$$

式中：

$u_{CRM}$  — 证书给出的硬度块的相对标准不确定度；

$u_x$  — 测量重复性引起的相对标准不确定度；

$u_s$  — 硬度块的稳定性引起的相对标准不确定度，一般情况下可不考虑；

$k$  — 包含因子，取值为 2。

## 2.3 工作硬度计的不确定度评定

### 2.3.1 不确定度评定方法

工作硬度计的不确定度评定一般采用间接法，同公式 6 和公式 7。

### 2.3.2 测量重复性引起的标准不确定度分量

假设硬度计重复性为 $W$ ，由于规程规定测量点数为 5 点，则按照极差法可算出 5 点硬度平均值的标准不确定度为：

$$u_x = \frac{W}{2.33 \times \sqrt{5}} \quad (8)$$

根据标准、规程中要求的不同标尺及硬度范围重复性的最大值，其标准不确定度分量见表 8。

表 8 工作硬度计重复性引入的标准不确定度分量

标尺及范围	重复性最大值，%	相对标准不确定度分量 $u_x$ ，%
(200~300)HV0.05	18.0	3.45
(400~500)HV0.05	12.0	2.30
(700~800)HV0.05	12.0	2.30
(200~300)HV0.1	18.0	3.45
(400~500)HV0.1	12.0	2.30
(700~800)HV0.1	12.0	2.30
(200~300)HV0.2	12.0	2.30
(400~500)HV0.2	8.0	1.54
(700~800)HV0.2	8.0	1.54

(200~300)HV0.3	12.0	2.30
(400~500)HV0.3	8.0	1.54
(700~800)HV0.3	8.0	1.54
(200~300)HV0.5	12.0	2.30
(400~500)HV0.5	8.0	1.54
(700~800)HV0.5	8.0	1.54
(200~300)HV1	12.0	2.30
(400~500)HV1	8.0	1.54
(700~800)HV1	8.0	1.54

### 2.3.3 工作硬度计的相对扩展不确定度

显微维氏硬度工作硬度计用标准显微维氏硬度块检定校准。标准显微维氏硬度块的测量不确定度及评定过程见“标准显微维氏硬度块不确定度评定”报告。工作硬度计的相对标准不确定度和相对扩展不确定度见表9。

表9 显微维氏硬度工作硬度计的测量不确定度

标尺及范围	相对标准不确定度分量 $u_{CRM}, \%$	相对标准不确定度分量 $u_x, \%$	相对标准不确定度 $u_{rel}, \%$	相对扩展不确定度 $U_{rel}(k=2), \%$
(200~300)HV0.05	3.02	3.45	4.6	9
(400~500)HV0.05	3.11	2.30	3.9	8
(700~800)HV0.05	3.28	2.30	4.0	8
(200~300)HV0.1	2.37	3.45	4.2	8
(400~500)HV0.1	3.02	2.30	3.8	8
(700~800)HV0.1	3.02	2.30	3.8	8
(200~300)HV0.2	1.82	2.30	2.9	6
(400~500)HV0.2	1.96	1.54	2.5	5
(700~800)HV0.2	2.71	1.54	3.1	6
(200~300)HV0.3	1.60	2.30	2.8	6
(400~500)HV0.3	1.51	1.54	2.2	4
(700~800)HV0.3	1.87	1.54	2.4	5
(200~300)HV0.5	1.47	2.30	2.7	5
(400~500)HV0.5	1.34	1.54	2.0	4
(700~800)HV0.5	1.51	1.54	2.2	4
(200~300)HV1	1.35	2.30	2.7	5
(400~500)HV1	1.18	1.54	1.9	4
(700~800)HV1	1.34	1.54	2.0	4

### 3、关于标准硬度块测量不确定度和硬度计示值最大允许误差关系的说明

表10总结了标准显微维氏硬度块扩展不确定度和标准、规程规定的显微维氏硬度计示值最大允许误差。两者之间近似满足1:2的关系。此处不满足1:3的关系是因为在制定最大允许误差时将 $\pm(|\Delta - U| \sim |\Delta + U|)$ 待定区间排除在外，直接将 $\pm|\Delta - U|$ 作为最大允许误差限。从国际比对的情况看，在硬度计量专业其它计量院也存在类似情况。

表 10 标准硬度块的相对扩展不确定度和硬度计示值最大允许误差

标尺及范围	标准块相对扩展不确定度 $U_{rel}(k=2)$ , %	硬度计示值最大允许误差, $\pm\%$
(200~300)HV0.05	6.0	13
(400~500)HV0.05	6.2	13
(700~800)HV0.05	6.6	14
(200~300)HV0.1	4.7	8.5
(400~500)HV0.1	6.0	12
(700~800)HV0.1	6.0	12
(200~300)HV0.2	3.6	6.8
(400~500)HV0.2	3.9	8.5
(700~800)HV0.2	5.4	12
(200~300)HV0.3	3.2	5.7
(400~500)HV0.3	3.0	6.8
(700~800)HV0.3	3.7	8.5
(200~300)HV0.5	2.9	5.0
(400~500)HV0.5	2.7	5.7
(700~800)HV0.5	3.0	6.8
(200~300)HV1	2.7	4.2
(400~500)HV1	2.4	5.0
(700~800)HV1	2.7	5.8