

# 工作毛细管黏度计常数测量结果不确定度评定

贺紫菲 张峻燊 卢梅

云南省计量测试技术研究院 云南 昆明 650000

**摘要:** 文章依据JJG 155—2016《工作毛细管黏度计检定规程》，通过对工作毛细管黏度计测量不确定度来源的全面分析，按照工作毛细管黏度计的类型与内径，得出相应规格型号的工作毛细管黏度计常数测量结果的不确定度。

**关键词:** 工作毛细管黏度计；黏度计常数；不确定度

## 引言

毛细管黏度计主要用于液体样本的运动黏度测量，广泛地运用在石油、化工、轻工、机电、国防、交通、煤碳、冶金、医药、食品、造纸、纺织、科研等单位。毛细管黏度计是在某一温度下采用常数已知的黏度计测量一定体积液体流经毛细管所用的时间，计算得到液体的运动黏度。文章通过对标准黏度液值引入的不确定度、重复性测量引入的标准不确定度、时间测量的不确定度、仪器安装倾斜所引起的不确定度、温度效应所产生的不确定度、标准黏度液不稳定引入的不确定度分析，结合实验数据，得出乌氏、平氏、芬氏、逆流黏度计不同内径的黏度计常数测量结果的不确定度。

## 1 检测方法

通过测量一定体积的标准黏度液在重力作用下流经毛细管所需时间，计算出被检毛细管黏度计的常数。

## 2 数学模型

$$C = (v_1/t_1 + v_2/t_2) / 2$$

式中：C—被检毛细管黏度计常数；

$v_1$ —标准黏度液1运动黏度；

$v_2$ —标准黏度液2运动黏度；

$t_1$ —标准黏度液1在黏度计中的流动时间；

$t_2$ —标准黏度液2在黏度计中的流动时间<sup>[1]</sup>。

## 3 测量不确定度来源分析

标准黏度液1的值引入的不确定度分量 $u_{1rel}$ 、标准黏度液2的值引入的不确定度分量 $u_{2rel}$ 、重复性测量引入的标准不确定度分量 $u_{3rel}$ 、时间测量的不确定度 $u_{4rel}$ 、仪器安装倾斜所引起的不确定度分量 $u_{5rel}$ 、温度效应所产生的不确定度分量 $u_{6rel}$ 、标准黏度液不稳定引入的不确定度分量 $u_{7rel}$ 。

## 4 标准不确定度分量的评定

### 4.1 标准黏度液1的值引入的不确定度分量 $u_{1rel}$

标准黏度液的不确定度由标准黏度液证书上给出，置信因子 $k=2$ ，因此：

(1) 黏度标准液1编号为GBW13601，相对扩展不确定

度 $U_{rel}=0.10%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.05%$ ， $k=2$ 。

(2) 黏度标准液1编号为GBW13602，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.16%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.08%$ ， $k=2$ 。

(3) 黏度标准液1编号为GBW13603，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.16%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.08%$ ， $k=2$ 。

(4) 黏度标准液1编号为GBW13604，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.21%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.11%$ ， $k=2$ 。

(5) 黏度标准液1编号为GBW13605，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.21%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.11%$ ， $k=2$ 。

(6) 黏度标准液1编号为GBW13606，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.27%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.14%$ ， $k=2$ <sup>[2]</sup>。

(7) 黏度标准液1编号为GBW13607，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.27%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.14%$ ， $k=2$ 。

(8) 黏度标准液1编号为GBW13608，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.33%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.17%$ ， $k=2$ 。

(9) 黏度标准液1编号为GBW13609，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.33%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.17%$ ， $k=2$ 。

(10) 黏度标准液1编号为GBW13610，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.39%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.20%$ ， $k=2$ 。

(11) 黏度标准液1编号为GBW13611，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.39%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.20%$ ， $k=2$ 。

(12) 黏度标准液1编号为GBW13612，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.44%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.22%$ ， $k=2$ 。

(13) 黏度标准液1编号为GBW13613，相对扩展不确定度 $U_{rel}=0.44%$ ， $k=2$ ，不确定度分量 $u_{1rel}=0.22%$ ， $k=2$ 。

### 4.2 标准黏度液2的值引入的不确定度分量 $u_{2rel}$

标准黏度液的不确定度由标准黏度液证书上给出，置信因子 $k=2$ ，因此：黏度标准液2编号为GBW13602~GBW13614，相对扩展不确定度和不确定度分量 $u_{2rel}$ 同4.1<sup>[3]</sup>。

### 4.3 重复性测量引入的标准不确定度分量 $u_{3rel}$

在20.00℃时，采用一级标准黏度液20.063mm<sup>2</sup>/s、51.028mm<sup>2</sup>/s对内径为1.0mm的平氏黏度计共进行10次

测量, 测量结果如下: 0.05711、0.05713、0.05710、0.05710、0.05711、0.05695、0.05694、0.05694、0.05693、0.05694, 得出: 平均值 = 0.05703, 实验标准偏差  $s = 8.973 \times 10^{-5}$

$$\text{故: } u_{3\text{rel}} = \frac{8.973 \times 10^{-5}}{0.05703} = 0.16\%$$

#### 4.4 时间测量的不确定度 $u_{4\text{rel}}$

根据检定规程, 运动黏度测量用秒表的分度值为 0.1S, 本次实验使用的秒表根据证书上的信息, 秒表在 (0~29) min 内的走时误差为 0.01 秒, 则该不确定度分量可忽略。但是由于操作人员的视差及习惯<sup>[4]</sup>, 当液面流经上、下刻线时判读的时机将会影响到计时结果, 该不确定度分量估计为 0.05%, 即:  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$

#### 4.5 仪器安装倾斜所引起的不确定度分量 $u_{5\text{rel}}$

黏度计校准时由于黏度计不垂直引入的不确定度分量估计值为 0.03%, 即:  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$

#### 4.6 温度效应所产生的不确定度分量 $u_{6\text{rel}}$

温度计由于热传导及响应时间带来的温度测量误差估计为 0.005℃, 为均匀分布,

$$\text{则: } \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-3} \text{℃}$$

$$u_{\text{rel}}(t_1) = \frac{2.89 \times 10^{-3}}{20} = 0.015\%$$

本次试验用石油产品运动黏度测定器恒温水槽 20℃ 时温场均匀性为 0.009℃<sup>[5]</sup>, 温场均匀性产生的不确定度

分量为:  $\frac{0.009}{2} = 4.5 \times 10^{-3} \text{℃}$

$$u_{\text{rel}}(t_2) = \frac{4.5 \times 10^{-3}}{20} = 0.023\%$$

数字温度计 20℃ 时测量结果的扩展不确定度为 0.04℃ ( $k = 2$ ), 数字温度计引入的不确定度分量为: 0.04/2 = 0.02℃

$$u_{\text{rel}}(t_3) = 0.02/20 = 0.10\%$$

上述三项不确定度分量互不相关, 则因温度效应所引入的相对标准不确定度为:

$$U_{6\text{rel}} = \sqrt{u_{\text{rel}}(t_1)^2 + u_{\text{rel}}(t_2)^2 + u_{\text{rel}}(t_3)^2} = 0.042\%$$

#### 4.7 标准黏度液不稳定引起的不确定度分量 $u_{7\text{rel}}$

标准黏度液有效期内, 黏度变化率 0.2%/2 年, 则黏度变化引入的不确定度分量为

$$u_{7\text{rel}} = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.1155\%$$

### 5 各不确定度分量的汇总表

(1) 内径为 0.24mm、0.36mm、0.46mm 的乌氏黏度计, 内径为 0.4mm 的平氏黏度计, 内径为 0.30mm、

0.44mm 的芬氏黏度计, 内径为 0.31mm、0.42mm 的逆流黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(2) 内径为 0.58mm 的乌氏黏度计, 内径为 0.6mm 的平氏黏度计, 内径为 0.54mm 的芬氏黏度计<sup>[6]</sup>, 内径为 0.54mm 的逆流黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.08\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(3) 内径为 0.63mm 的芬氏黏度计, 内径为 0.63mm 的逆流黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.08\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.08\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(4) 内径为 0.73mm、0.88mm 的乌氏黏度计, 内径为 0.8mm 的平氏黏度计, 内径为 0.78mm 的芬氏黏度计, 内径为 0.78mm 的逆流黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.08\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.11\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(5) 内径为 1.03mm 的乌氏黏度计, 内径为 1.0mm 的平氏黏度计, 内径为 1.01mm 的芬氏黏度计, 内径为 1.02mm 的逆流黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.11\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.11\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(6) 内径为 1.2mm 平氏黏度计, 内径为 1.27mm 芬氏黏度计, 内径为 1.26mm 逆流黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.11\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.14\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(7) 内径为 1.36mm、1.55mm 的乌氏黏度计, 内径为 1.5mm 的平氏黏度计, 内径为 1.52mm 的芬氏黏度计, 内径为 1.48mm 的逆流黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.14\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.14\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(8) 内径为 1.83mm 的乌氏黏度计, 内径为 2.0mm 的平氏黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.14\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.17\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(9) 内径为 1.92mm、2.35mm 的芬氏黏度计, 内径为 1.88mm、2.20mm 逆流黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.17\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.17\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}} = 0.042\%$ ,  $u_{7\text{rel}} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(10) 内径为 2.43mm、2.75mm 的乌氏黏度计, 内径为 2.5mm 的平氏黏度计不确定度分量  $u_{1\text{rel}} = 0.17\%$ ,  $u_{2\text{rel}} = 0.20\%$ ,  $u_{3\text{rel}} = 0.16\%$ ,  $u_{4\text{rel}} = 0.05\%$ ,  $u_{5\text{rel}} = 0.03\%$ ,  $u_{6\text{rel}}$

= 0.042%,  $u_{7rel} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(11) 内径为3.27mm的乌氏粘度计, 内径为3.0mm、3.5mm的平氏粘度计, 内径为3.20mm的芬氏粘度计, 内径为3.10mm的逆流粘度计不确定度分量 $u_{1rel} = 0.20\%$ ,  $u_{2rel} = 0.20\%$ ,  $u_{3rel} = 0.16\%$ ,  $u_{4rel} = 0.05\%$ ,  $u_{5rel} = 0.03\%$ ,  $u_{6rel} = 0.042\%$ ,  $u_{7rel} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

(12) 内径为4.0mm、5.0mm的平氏粘度计, 内径为4.20mm的芬氏粘度计<sup>[7]</sup>, 内径为4.00mm逆流粘度计不确定度分量 $u_{1rel} = 0.20\%$ ,  $u_{2rel} = 0.22\%$ ,  $u_{3rel} = 0.16\%$ ,  $u_{4rel} = 0.05\%$ ,  $u_{5rel} = 0.03\%$ ,  $u_{6rel} = 0.042\%$ ,  $u_{7rel} = 0.1155\%$ ,  $k = 2$ 。

### 6 合成标准不确定度的评定

以上各分量彼此独立不相关, 因此合成标准不确定度:

$$u_{rel}(c) = \sqrt{U_{1rel}^2 + U_{2rel}^2 + U_{3rel}^2 + U_{4rel}^2 + U_{5rel}^2 + U_{6rel}^2 + U_{7rel}^2}$$

### 结束语

文章通过对标准黏度液值引入的不确定度、重复性测量引入的标准不确定度、时间测量的不确定度、仪器安装倾斜所引起的不确定度、温度效应所产生的

不确定度、标准黏度液不稳定引入的不确定度分析, 结合实验数据, 得出乌氏、平氏、芬氏、逆流黏度计不同内径的黏度计常数测量结果的不确定度, 即 $U_{rel} = (0.44 \sim 0.79)\%$ ,  $k = 2$ 。

### 参考文献

- [1]JJG1059.1-2012, 测量不确定度评定与表示[S].北京: 中国计量出版社, 2012;
- [2]JJG155-2016, 工作毛细管黏度计检定规程[S].北京: 中国计量出版社, 2016;
- [3]周永良,王朔,刘炳均.石油产品运动黏度测量不确定度评定[J].工业计量, 2019;
- [4]许向梅,工作毛细管黏度计常数测量结果不确定度的评定[J].中国计量, 2019;
- [5]高旭辉,吴永顺,薛征,于得水,李域.毛细管黏度计常数的测量不确定度评定[J].石油工业技术监督, 2021;
- [6]徐广强,王婷,张明,刘巍,王晓康.工作毛细管黏度计校准结果的不确定度评定[J].工业计量, 2022;
- [7]JJF1033-2023, 计量标准考核规范[S].北京: 中国质检出版社, 2023。