



**CNAS 技术报告**

**建设领域典型检验检测设备计量溯源在检  
测结果不确定度评定中的应用**

中国合格评定国家认可委员会

## 目录

1 适用范围.....	2
2 参考文件.....	2
3 术语和定义.....	2
4 测量结果的不确定度评定.....	3
附录 A 混凝土用热轧带肋钢筋抗拉强度的不确定度评定.....	14
附录 B 混凝土立方体抗压强度的不确定度评定.....	19
附录 C 保温材料导热系数测量不确定度的评定.....	24
附录 D 水泥烧失量检测结测量不确定度评定.....	29
附录 E 室内环境空气中 TVOC 浓度测量不确定度评定.....	31
附录 F 沥青混合料马歇尔稳定度测量不确定度评定.....	35
附录 G 沥青针入度不确定度评定.....	38
附录 H 钢筋保护层厚度测量结果的不确定度评定.....	43

# 建设领域典型检验检测设备计量溯源在检测结果 不确定度评定中的应用

## 1 适用范围

本报告主要描述了建设领域检测结果不确定度评定过程中的术语、定义、评定步骤以及检测设备及其计量溯源对检测结果不确定度的贡献,并给出了建设领域几个典型参数的不确定度评估实例。

本文件适用于建设领域检测结果的不确定度评定。

## 2 参考文件

本报告主要参考了以下文件。

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

CNAS-CL01-G002 测量结果的溯源性要求

## 3 术语和定义

JJF 1001 界定的定义适用于本文件,为了便于取用,在本文件中列出

**测量不确定度 (简称不确定度)**: 根据所用到的信息,表征赋予被测量量值分散性的非负参数。

注 1: 测量不确定度包括由系统影响引起的分量,如与修正量和测量标准所赋量值有关的分量及定义的不确定度。有时对估计的系统影响未作修正,而是当作不确定度分量处理。

注 2: 此参数可以是诸如称为标准测量不确定度的标准偏差(或其特定倍数),或是说明了包含概率的区间半宽。

注 3: 测量不确定度一般由若干分量组成。其中一些分量可根据一系列测量值的统计分布,按测量不确定度的 A 类评定进行评定,并可用标准差表征。而另一些分量则可根据基于经验或其他信息所获得的概率密度函数,按测量不确定度的 B 类评定进行评定,也用标准偏差表征。

注 4: 通常,对于一组给定的信息,测量不确定度是相应于所赋予被测量的值的。该值的改变将导致相应的不确定度的改变。

**标准不确定度**: 以标准偏差表示的测量不确定度。

**合成标准不确定度**: 由在一个测量模型中各输入量的标准测量不确定度获得的输出量的标准测量不确定度。

**相对标准不确定度**: 标准不确定度除以测得值的绝对值。

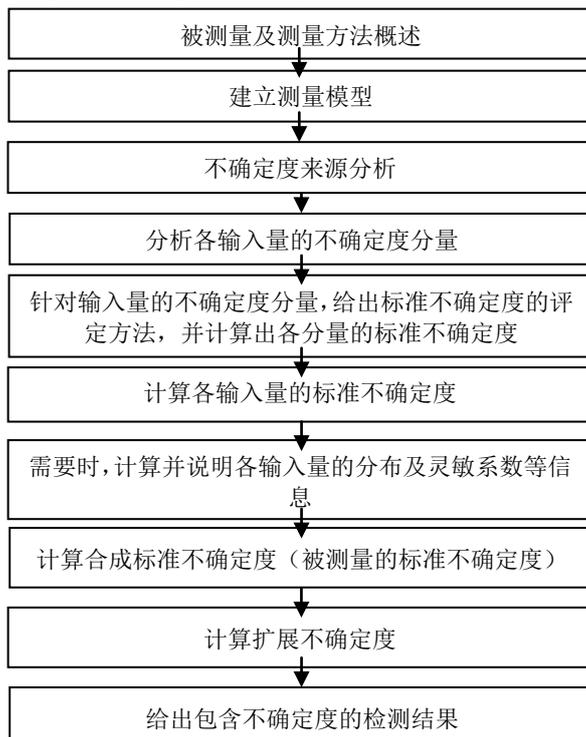
**示值误差：**测量仪器示值与对应输入量的参考量值之差。

**最大允许测量误差（简称最大允许误差又称误差限）：**对给定的测量、测量仪器或测量系统，由规范或规程所允许的，相对于已知参考量值的测量误差的极限值。

**扩展不确定度（全称扩展测量不确定度）：**合成标准不确定度与一个大于 1 的数字因子的乘积。

## 4 测量结果的不确定度评定

### 4.1 测量结果的不确定度的评定步骤一般为：



#### 4.1.1 被测量及测量方法概述

被测量的测量结果与测量方法密切相关，对测量对象和测量方法进行清晰而准确的描述，是保证测量结果的准确性并客观评估其不确定度的基础，因此在评定测量结果的不确定度时，首先应对被测量的定义及量纲进行说明，并概述具体的检测方法，如环境要求及其控制情况，所用仪器设备及其溯源情况，取样和样品的处理、结果的计算及修约以及过程中是否存在近似和假设等。

#### 4.1.2 建立测量模型

建设领域检验检测中，有些检测参数可以根据测量方法给出明确的测量模型，但有些是无法建立明确的测量模型或者测量模型的建立很复杂。

对于可以直接建立测量模型的，可以用直接评定法评定检测结果的不确定度。直接评定法是指在试验条件（检测方法、环境条件、测量设备、被测对象、检测过程等）明确的基础上，建立由检测原理所给出的数学模型，即输出量  $Y$  与若

若干个输入量  $X_i$  之间的函数关系  $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。如果对数学模型中的所有输入量进行了测量不确定度的评定,并且由检测方法所确定的数学模型能较容易的求出所有输入量的灵敏系数以及各输入量之间具有明确的相关性时,采用直接评定法是可行的。

对于不能建立明确测量模型的或测量模型的建立很复杂,可采用综合评定法评定检测结果的不确定度。综合评定法的思路是在试验过程满足相关标准的条件下,通过大量的重复测量将样品、环境、人员等带来的不确定度进行综合评定,然后再将仪器设备、数值修约等带来的不确定度分量进行合成。综合评定法的数学模型可以写成:  $Y=X_1+X_2+\dots+X_n$ 。

### 4.1.3 不确定度来源分析

不确定度评定时,应尽量找出不确定度的来源。检验检测中,可能导致测量不确定度的因素很多,主要有:

#### 4.1.3.1 被测量的定义不完整

被测量定义不完整将导致方法偏差。一般情况下被测量的定义比较完整,只是实现定义的手段可能存在近似和假设,定义不完整的情况比较少见。

#### 4.1.3.2 复现被测量的测量方法不理想

测量方法与程序的规定不够严密,执行方法和程序上存在差异等。在建设工程检测领域,很多参数的检测有基础法和代用法,一般情况下,基础法是按被测量的定义研究的测量方法,代用法时是从实践经验中总结出的得到普遍认可的方法。两种方法的检测结果可能相同,但两种方法带来的测量结果不确定度可能是不同的。

#### 4.1.3.3 取样的代表性不够,即被测样本可能不完全代表所定义的被测量

取样带来的不确定度包括取样的代表性、试样均匀性等。

在建设工程领域,有些样品是非匀质的(如混凝土试件),有些样品的检测需要实验室制备具有一定要求的测试样品(如水泥胶砂强度试件);并且很多测试是具有破坏性的,无法重复检测。因此,样品带来的不确定度一般是不能忽略的。

一般情况下,我们所说的“测量不确定度”是指测量程序导致的结果不确定度,主要包含了测试样品的均匀性和制样的重复性导致的不确定度,并不能代表批量物质物理特性的不确定度。

样品均匀性和/或制样重复性带来的测试结果的不确定度可以用 A 类评定方法进行评定,可以按照要求提前制备一批样品(为了减少自由度的影响一般需要 10 个及以上样品),在重复条件下对该批样品进行测试,然后用贝塞尔公式计算出单个样品的标准差即为单个样品的标准不确定度。在实际检测中,对相同或同类样品的检测,可以利用上述估算得出的单个样品的标准不确定度求出一组样品

平均值的标准不确定度。

#### 4.1.3.4 测试环境的影响

测量工作都是在一定的环境条件下进行的,对测量受环境条件的认识不足或对环境条件的测量不完善将带来检测结果的不确定度。当环境对测试结果影响较大时,对环境条件的要求往往比较严格,当环境对测试结果影响较小时,对环境条件的要求往往比较宽泛。但是不管怎样,环境条件不可能是一成不变的。建设领域中,很多样品的养护和测试需要在有一定要求的恒温恒湿室进行,恒温恒湿条件的波动以及对环境条件测量的不完善,都会带来测量结果的不确定度。

#### 4.1.3.5 测量仪器的不确定度

测量仪器在制造过程中,其计量特性如最大允许误差、灵敏度、鉴别力、分辨力、死区及稳定性等均会带来不确定度,一般情况下将其简称为仪器设备的不确定度。仪器设备的不确定度一般采用 B 类评定。

#### 4.1.3.6 测量标准或标准物质提供的标准值的不准确性

测量标准或标准物质提供的标准值是一个相对的概念,其满足有关溯源要求时即视为标准值,实际上标准值本身也是带有测量不确定度的。但是在建设领域检测过程中,测量标准或标准物质的标准值的不确定度以及校准结果本身的不确定度往往较小,往往给予忽略(不确定度评估实例中可以看到)。

#### 4.1.3.7 引用的常数或其他参数值的不准确

在从输入量到输出量的计算过程中时,往往会引用些常数,如  $\pi$ 、 $\sqrt{2}$  等,这些数不是准确数,因此会带来不确定度。当有效位数足够时,可以忽略其带来的不确定度。

#### 4.1.3.8 测量方法和测量程序的近似和假设

在实际检测中,测量方法和测量程序的近似和假设会带来测量结果的不确定度。如:热轧带肋钢筋抗拉强度测试过程中,内径在一定范围内时,按公称直径计算所带来的不确定度;混凝土凝结时间测试计算时,曲线的拟合带来的不确定度。

#### 4.1.3.9 测量重复性

测量的重复性主要体现的是随机效应带来的不确定度,一般采用 A 类评定。

#### 4.1.3.10 其他

除上述因素外,其他因素也会带来测量结果的不确定度。如:对测试方法规定的精度进行修约导致最终结果的不确定度。结果修约导致的不确定度一般采用 B 类评定。

在实际测量中,除了定义带来的不确定度外,可从样品、测量仪器、测量环境、测量人员、测量方法等方面全面考虑,特别要注意对测量结果影响较大的不确定度来源,应尽量做到不遗漏、不重复。

#### 4.1.4 标准不确定度的评定

标准不确定度按评定方法分为：A 类评定、B 类评定。A 类评定是用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度，B 类评定是用不同于对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度。

##### 4.1.4.1 标准不确定度的 A 类评定

###### (1) 标准偏差法

用贝塞尔公式计算出的试验标准偏差  $s$  来表示 A 类评定标准不确定度 (type A evaluation standard uncertainty)，即：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

(1-1)

式中  $s$  —— 试验标准差；

$x_i$  —— 第  $i$  次独立观测结果；

$n$  —— 独立观测次数；

$\bar{x}$  ——  $n$  次独立观测结果的算数平均值  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

在实际应用中必须注意区分以下三种情况：

①如果测量结果取观测列任一次  $x_i$  值，对应的标准不确定度为：

$$u(x_i) = s \quad (1-2)$$

②当测量结果取  $n$  次观测列值的平均值  $\bar{x}$  时，A 类评定标准不确定度是：

$$u(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1-3)$$

③当测量结果取其中的  $m$  个观测值的平均值  $\bar{x}_m$  时，所对应的 A 类评定标准不确定度为：

$$u(\bar{x}_m) = \frac{s}{\sqrt{m}} \quad (1-4)$$

式中， $1 \leq m \leq n$ ，次数  $n$  越大越可靠，一般  $n \geq 10$ 。

这三种情况的自由度都为：

$$v = n - 1 \quad (1-5)$$

## (2) 合并样本标准差

必须指出,为提高测量不确定度评定结果的可靠性,应采用合并样品标准差  $s_p$ ,即对输入量  $x$  在重复条件下进行了  $n$  次独立测量,得到  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,其平均值为  $\bar{x}$ ,实验标准差为  $s$  [由式 (1-1) 给出],自由度为  $\nu$  [由式 (1-5) 给出]。如果进行  $m$  组这样的测量,则合并样品标准差  $s_p$  可按下式计算:

$$s_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2} = \sqrt{\frac{1}{m(n-1)} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (1-6)$$

自由度:

$$\nu_p = \sum_{j=1}^m \nu_j \quad (1-7)$$

式中  $\nu_p$  ——高可靠性合并样本标准差的自由度;

$\nu_j$  —— $m$  组测量列中第  $j$  组测量列的自由度 =  $n-1$ 。

所以式 (1-7) 也可以写为:

$$\nu_p = m \times (n-1)$$

在重复条件下或复现性条件下进行规范化测量时,在测量状态稳定并受控的条件下,其测量结果的 A 类评定标准不确定度不需要对每次测量结果都进行评定,可直接采用预先评定的高可靠性合并样本标准差  $s_p$ 。但应注意,只有在同类型被测量较稳定, $m$  组测量列的各个标准差  $s_j$  相差不大,即  $s_j$  的不确定度可以忽略时,才能使用同一个  $s_p$ 。因为测量列的标准差  $s_j$  也是一个变量,标准差  $\hat{\sigma}(s)$  为:

$$\hat{\sigma}(s) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (s_j - \bar{s})^2}{(m-1)}} \quad (1-8)$$

式中  $\bar{s}$  ——标准差的平均值,即  $\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_j$ ;

$m$  ——测量列组数;

$s_j$  ——第  $j$  组测量列的标准差。

而  $\hat{\sigma}(s)$  的估计值  $\hat{\sigma}_{\text{估}}(s)$  为:

$$\hat{\sigma}_{\text{估}}(s) = \frac{s_p}{\sqrt{2(n-1)}} \quad (1-9)$$

式中  $n$ ——测量列的测量次数。

在评定时计算出  $\hat{\sigma}_{\text{估}}(s)$  后必须进行以下判断:

①假如  $m$  组测量列标准差  $s_j$  的标准差:

$$\hat{\sigma}(s) \leq \hat{\sigma}_{\text{估}} \quad (1-10)$$

则表示测量状态稳定, 高可靠度的  $s_p$  可以应用。

②如果

$$\hat{\sigma}(s) > \hat{\sigma}_{\text{估}} \quad (1-11)$$

则表示测量状态不稳定, 高可靠度的  $s_p$  不可应用, 这时可采用  $s_j$  中的  $s_{\text{max}}$  来

评定。如当  $n=9$  时,  $\hat{\sigma}_{\text{估}}(s) = \frac{s_p}{4}$ , 所以, 如果  $m$  组测量列标准差  $s_j$  的标准差

$\hat{\sigma}(s) \leq \frac{s_p}{4}$ , 则测量稳定,  $s_p$  可应用, 否则只能应用  $s_j$  中的  $s_{\text{max}}$  来评定。

必须指出, 这种判定方法虽然具有一定的近似性, 然而方法方便易行, 可操作性强, 具有实用性。

在实际应用时, 对于较稳定的同类型被测量, 在预先的评定中, 得到了高可靠性的合并样本标准差  $s_p$  后, 在以后的测量中, 如果对输入量  $x$ , 只进行了  $k$  次测量 ( $1 \leq k \leq n$ ), 以  $k$  次测量的平均值  $\bar{x}_k$  作为测量结果, 则该结果的标准不确定度为:

$$u(\bar{x}_k) = \frac{s_p}{\sqrt{k}} \quad (1-12)$$

$u(\bar{x}_k)$  的自由度均等于  $s_p$  的自由度, 即:

$$v_{x_k} = v_p = n - 1 \quad (1-13)$$

十分明显, 计算合并标准偏差  $s_p$ , 采用的方法实质上属于贝塞尔公式法。

### (3) 极差法

在测量次数较小是, (一般认为次数  $n=4\sim 9$  为宜), 输入量接近正态分布时, 可采用极差法, 即单次结果  $x_i$  的试验标准差  $s$  为:

$$s = R / C \quad (1-14)$$

式中  $C$  ——极差系数

$R$  ——极差 ( $R=x_{\max}-x_{\min}$ )。

平均值的标准不确定度为:

$$u(\bar{x}) = s / \sqrt{n} = R / (\sqrt{n} C) \quad (1-15)$$

测量次数  $n$ , 极差系数  $C$ , 自由度  $\nu$  的数据如表 1-1 所示。

表 1-1 测量次数  $n$ , 极差系数  $C$ , 自由度  $\nu$  的数据

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9
$C$	1.13	1.64	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97
$\nu$	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.3	6.0	6.8

同一问题的计算表明, 极差法与标准偏差法相比, 不确定度增大, 自由度下降, 可靠度降低。

#### 4.1.4.2 标准不确定度的 B 类评定

##### (1) 基本计算公式

1) B 类评定的方法是根据有关的信息或经验, 判断被测量的可能值区间  $[\bar{x}-a, \bar{x}+a]$ , 假设被测量值的概率分布, 根据概率分布和要求的概率  $p$  确定  $k$ , 则 B 类标准不确定度  $u_B$  可由公式 (1-16) 得到:

$$u_B = \frac{a}{k} \quad (1-16)$$

式中:

$a$  ——被测量可能值区间的半宽度。

$k$  ——包含因子。

区间半宽度  $a$  一般根据以下信息确定:

- a) 以前测量的数据;
- b) 对有关技术资料 and 测量仪器特性的了解和经验;
- c) 生产厂提供的技术说明书;
- d) 校准证书、检定证书或其他文件提供的数据;
- e) 手册或某些资料给出的参考数据;
- f) 检定规程、校准规范或测试标准中给出的数据;
- g) 其他有用的信息。

##### 2) $k$ 的确定方法

- a) 已知扩展不确定度是合成标准不确定度的若干倍时，该倍数就是包含因子  $k$ 。
- b) 假设为正态分布时，根据要求的概率查表 2 得到  $k$ 。

表 2 正态分布情况下概率  $p$  与置信因子  $k$  间的关系

$p$	0.5	0.68	0.90	0.95	0.9545	0.99	0.9973
$k$	0.675	1	1.645	1.960	2	2.576	3

- c) 假设为非正态分布时，根据概率分布表查表 3 得到  $k$ 。

表 3 常用非正态分布的置信因子  $k$  及 B 类标准不确定度  $u_B(x)$ 

分布类型	$p$ (%)	$k$	$u_B(x)$	应用范围
三角	100	$\sqrt{6}$	$a/\sqrt{6}$	①两个相同均匀分布的合成 ②两个独立量之和值或之差等
梯形 ( $\beta = 0.71$ )	100	2	$a/2$	①已知被测量的分布是两个不同大小的均匀分布合成时，则可假设为梯形分布
矩形(均匀)	100	$\sqrt{3}$	$a/\sqrt{3}$	①数据修约 ②测量仪器最大允许误差或分辨力 ③参考数据的误差限 ④仪器的零位误差 ⑤温度等环境因素引起的影响量 ⑥操作人员读数偏差 ⑦对被测量的可能值落在区间内的情况缺乏了解等
反正弦	100	$\sqrt{2}$	$a/\sqrt{2}$	①读盘偏心引起的测角 ②正弦振动引起的位移 ③随时间正弦或余弦变化的温度不确定度等
两点	100	1	$a$	①按级使用量块时(除 00 级以外)，中心长度偏差

注：表 3 中  $\beta$  为梯形的上底与下底之比，对于梯形分布来说， $k = \sqrt{6/(1+\beta^2)}$ 。

当  $\beta$  等于 1 时，梯形分布变为矩形分布；当  $\beta$  等于 0 时，变为三角分布。

## (2) 建工领域常用的 B 类评定

## 1) 校准结果带来的不确定度

如果设备校准证书中给出了扩展不确定度  $U$  包含因子  $k$ ，则其标准不确定度为：

$$u_B = \frac{U}{k} \quad (1-17)$$

## 2) 设备的最大允差带来的不确定度

某测量设备的最大允差为  $\Delta$ ，其概率分布可以近似的估计为均匀分布，则最大允差带来的标准不确定度为：

$$u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (1-18)$$

在实际检测过程中，根据我国的有关法律法规，很多设备的符合性采用计量检定的方式进行溯源，如果检定结果为合格的，说明设备的计量特性在其允差范围内，此时可以按上述方法给出设备最大允差带来的不确定度。

## 3) 仪器分辨力带来的不确定度

仪器设备的分辨力为  $\delta$ ，其概率分布可估计为均匀分布，则仪器设备分辨力带来的标准不确定度为：

$$u_B = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} \quad (1-19)$$

## 4) 对量值进行数字修约时，修约带来的不确定度

对量值进行数字修约，修约间隔为  $\delta$ ，其概率分布可估计为均匀分布，则修约带来的标准不确定度为：

$$u_B = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} \quad (1-20)$$

5) 已知测量结果的重复性或再现性限  $R$ ，则重复性或再现性带来的标准不确定度为：

$$u_B = \frac{R}{2\sqrt{2}} \quad (1-21)$$

由此可见，重复性或再现性带来的标准不确定度既可以用 A 类评定也可以用 B 类评定。A 类在一定程度上可以转化为 B 类评定。

#### 4.1.5 合成标准不确定度 $u_c$

4.1.5.1 当被测量  $Y$  由  $n$  个其他量  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，通过线性测量函数  $f$  确定时，被测量的估计值  $y$  的合成标准不确定度可由公式 (1-22) 得到：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 (u_i)^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} (r_{ij}) x_i (u_i) x_j (u_j)} \quad (1-22)$$

式中： $u_c(y)$  ——合成标准不确定度；

$y$  ——被测量  $Y$  的估计值；

$x_i$  ——输入量  $X_i$  的估计值；

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$  ——灵敏系数；

$u(x_i)$  ——输入量  $x_i$  的标准不确定度；

$r(x_i, x_j)$  ——输入量  $x_i$  和  $x_j$  的相关系数；

$u(x_i, x_j)$  ——输入量  $x_i$  和  $x_j$  的协方差。

**4.1.5.2** 当各分量互不相关时,相关系数  $r(x_i, x_j) = 0$ , 灵敏系数  $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$  合成标准不确定度  $u_c(y)$  可简化下列公式 (1-23):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i)} \quad (1-23)$$

注 1: 所谓不相关, 是指不同设备测量同一类参量, 比如: 测量面积时, 长和宽用不同的尺子。

如果数学模型中输入量之间是乘、除关系, 且独立、不相关, 那么不仅输出量的绝对合成标准不确定度等于各个输入量绝对不确定度分量 (已乘灵敏系数  $c_i$ ) 的方和根, 而且输出量的相对合成不确定度等于各输入量相对不确定度分量的方和根。如公式

$$u_{c,r}(y) = \sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) + \dots + u^2(x_n)} \quad (1-24)$$

## 4.1.6 确定扩展不确定度

**4.1.6.1** 扩展不确定度是被测量可能值包含区间的半宽度, 扩展不确定度分为  $U$  和  $U_p$  两种。

4.1.6.2 输出量估计值  $y$  的分布未知, 采用  $U$  的表示方式。

扩展不确定度  $U$  由合成标准不确定度  $u_c(y)$  乘包含因子  $k$  得到, 即:

$$U = k u_c(y) \quad (1-25)$$

通常情况取  $k=2$ 。当给出扩展不确定度  $U$  时, 一般应注明所取的  $k$  值; 若未注明  $k$  值, 则指  $k=2$ 。

4.1.6.3 输出量的估计值  $y$  确定为正态分布或接近正态分布, 在必须采用且可能给出  $U_p$  的情况下 (例如某些技术规范中规定) 采用  $U_p$  表示方式。

扩展不确定度  $U_p$  由  $u_c(y)$  乘给定概率  $p$  的包含因子  $k_p$  得到, 即:

$$U_p = k_p u_c(y) \quad (1-26)$$

$k_p$  是包含概率为  $p$  的包含因子, 扩展不确定度为  $U_p$  时, 应同时给出概率分布。通常情况为  $U_{95}$ 。

#### 4.1.7 测量结果的表示

4.1.7.1 输出量估计值  $y$  的分布未知时, 测量结果可以表示为公式 (1-27):

$$Y = y \pm U, (k=2) \quad (1-27)$$

式中:

$y$  为测量结果的估计值,  $U$  为扩展不确定度,  $k$  为包含因子。

4.1.7.2 输出量的估计值  $y$  确定为正态分布或接近正态分布, 且必须采用  $U_p$  时, 测量结果可以表示为公式 (1-28):

$$Y = y \pm U_p \quad (1-28)$$

式中:

$y$  为测量结果的估计值,  $U_p$  为扩展不确定度,  $U_p$  通常为  $U_{95}$ 。

4.1.7.3 报告测量结果的不确定度时, 应明确说明被测量  $Y$  的定义, 给出被测量  $Y$  的估计值  $y$  及其扩展不确定度  $U$  或  $U_p$ ; 必要时也可给出相对扩展不确定度; 对  $U$  给出  $k$  值, 对  $U_p$  给出概率分布。测量结果不确定度的有效位数一般不超过两位。通常, 在相同计量单位下, 被测量的估计值修约到其末位与不确定度的末位一致。

#### 4.2 测量结果的不确定度的应用

检验检测机构可以根据对各输入量的不确定度分量的分析, 不断优化检测过程, 以降低检测结果的不确定度, 提高检测结果的准确性。

## 附录 A 混凝土用热轧带肋钢筋抗拉强度的不确定度评定

### 混凝土用热轧带肋钢筋抗拉强度的不确定度评定

#### A.1 概述

A.1.1 被测对象：2 根规格型号为 HRB400，公称直径  $\Phi 20$ ，长度 400mm 的钢筋混凝土用热轧带肋钢筋（以下简称钢筋）；

A.1.2 检测参数：抗拉强度

A.1.3 依据标准：依据《金属材料室温拉伸试验方法》GB/T228.1-2010 进行测试，依据《钢筋混凝土用钢 第二部分 热轧带肋钢筋》GB1499.2-2007 进行评价。

A.1.4 测试过程：在室温（10℃~35℃）条件下，用游标卡尺测量钢筋的内径，其偏差均在允许范围（ $\pm 0.5\text{mm}$ ）内。然后用钢筋打点机在钢筋上打标距，用游标卡尺测量钢筋的原始标距  $L_0$ ，将钢筋固定在检定合格的万能试验机（量程为 300kN 的，精度为 I 级）上，在规定的加荷速率下，对钢筋施加轴向拉力直至钢筋被拉断。测试钢筋被拉至断裂过程的最大力  $F_m$ ，并通过计算得到钢筋的抗拉强度  $R_m$ （精确至 1MPa），然后修约至 5MPa。

A.1.5 以往资料：以前曾对该厂生产的同类型的钢筋进行过 12 次重复测量，其抗拉强度分别为：636、631、643、646、638、642、634、635、648、640、637、646（MPa）。

A.1.6 检测结果及符合性判定：两根钢筋的抗拉强度分别为：636MPa、642MPa，修约后均为 640MPa，满足标准不小于 540MPa 的要求。

A.1.7 评定要求：对两根钢筋的抗拉强度检测结果的不确定度进行评定。

#### A.2 被测量的测量模型

根据 GB/T 228.1-2010 标准，钢筋抗拉强度按式 A-1 计算。

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (\text{A-1})$$

式中： $F_m$  为钢筋拉断时的最大拉力即极限荷载

$S_0$  为钢筋的公称面积

#### A.3 被测量的不确定度来源的分析

由上述分析可以看出，钢筋抗拉强度的不确定度主要来源于极限荷载的测量带来的不确定度、公称面积带来的不确定度，样品的不均匀性（重复性测量）带来的不确定度以及对结果的修约带来的不确定度。

#### A.4 各输入量不确定度分量及标准不确定度的计算

#### A.4.1 影响极限荷载的不确定度分量及标准不确定度

根据测量过程可以看出，影响极限荷载的不确定度主要有：拉力试验机的准确性带来的不确定度（按照实际可以分为检定和校准）、拉力试验机的分辨力带来的不确定度、拉伸速率带来的不确定度、环境温度带来的不确定度、人员操作带来的不确定度分量。

检测所使用的 I 级拉力试验机经检定合格，即其示值误差在  $\pm 1\%$  范围内，将其估计为均匀分布，则其准确性带来的相对标准不确定度可以按 B 类评价，为

$$u_{\delta} = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.577\% \quad (\text{A-2})$$

拉力试验机为自动读数，其分辨力为 0.01kN，区间半宽为 0.005kN，可将其估计为均匀分布，则其带来的标准不确定度按 B 类评价，为

$$u_{\Delta} = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.00289\text{kN} \quad (\text{A-3})$$

从检测结果可以看出，极限荷载近似为 170kN，其相对标准不确定度为 0.002%。由此可见设备分辨力带来的不确定度相对于设备本身的准确性而言，完全可以忽略不计。

检测标准对拉伸速率和环境温度等给出了明确要求，检测时，试验机可以根据要求设定拉伸速率，并且对环境温度也有监控（环境温度的控制往往严于标准），因此可以认为在标准规定的拉伸速率范围内和环境温度范围内，拉伸速率和环境温度对极限荷载的影响均可以忽略不计。

钢筋抗拉试验操作简单，并且最大力为计算机自动读数，因此人员操作带来的不确定度也可以忽略不计。

综上所述，输入量极限荷载的不确定度主要来源于拉力试验机，其相对标准不确定度为

$$u_{r_{e\delta}} = u_{F_{\Delta}} = 0.577 \quad (\text{A-4})$$

#### A.4.2 影响面积测量的不确定度分量及标准不确定度

根据 GB 1499.2-2007 的规定，在热轧带肋钢筋拉伸性能的试验中，计算钢筋强度用横截面积采用由公称直径计算出的公称横截面积，即：

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (\text{A-5})$$

对满足标准的热轧带肋钢筋，不同的公称直径可以有不同允许偏差。本文所采用的钢筋为公称直径  $\Phi 20$  的热轧带肋钢筋，标准规定其内径的允许偏差为  $\pm 0.5\text{mm}$ ，远大于测量所用游标卡尺（分辨力 0.01mm）以及人员读数带来的不确

定度，因此由测试仪器（游标卡尺）及人员在测量热轧带肋钢筋的公称直径时引入的不确定度分量可以忽略。可认为服从均匀分布，按照 B 类评定，钢筋公称直径 D 的允许偏差引入的标准不确定度为按 B 类评定，其估计为均匀分布，则其标准不确定度为

$$u_D = \frac{\Delta_D}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \quad (\text{A-6})$$

相对不确定度为

$$u_{D,r} = \frac{u_D}{D} \times 100\% = \frac{0.289}{20} \times 100\% = 1.44\% \quad (\text{A-7})$$

在面积的计算中，常数  $\pi$  带有无限不循环小数，其也会带来不确定度，根据 GB 1499.2-2007 的有关规定，用公称直径计算公称面积时， $\pi$  取值为 3.14，舍去的数值不超过 0.0016，相对偏差不超过 0.051%，因此其带来的不确定度也可以忽略不计。

由式 A-5 可以得出面积 A 的标准不确定度为

$$u_A = \frac{\partial S}{\partial D} u_D = \frac{\pi D}{2} u_D = 9.07 \text{mm}^2 \quad (\text{A-8})$$

相对标准不确定度为

$$u_{A,r} = \frac{u_A}{S} \times 100\% = 2.88\% \quad (\text{A-9})$$

#### A.4.3 样品的不均匀性（重复性测量）带来的不确定度

根据以往检测结果，样品不均匀性带来的不确定度可以按 A 类评定，根据贝塞尔公式，样品的标准偏差也即单次测量结果的标准不确定度为：

$$u_x = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (x_i - \bar{x})^2}{11}} = 5.38 \text{MPa} \quad (\text{A-10})$$

相对标准不确定度为：

$$u_{x,r} = \frac{u_{x_i}}{x} \times 100\% = \frac{5.38}{640} \times 100\% = 0.841\% \quad (\text{A-11})$$

由于测量次数较多，不再考虑其自由度。

#### A.4.4 结果修约带来的不确定度。

按标准 YB/T081-2013 的要求，检测结果修约至 5MPa，修约带来的不确定度按 B 类评定，其标准不确定度为：

$$u_s = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} = \frac{5}{2\sqrt{3}} = 1.44 \text{MPa} \quad (\text{A-12})$$

其相对标准不确定度为

$$u_{s,r} = \frac{u_s}{x} \times 100\% = 0.226\% \quad (\text{A-13})$$

### A.5 各输入量的不确定度汇总表

为了便于合成标准不确定度的计算,将上述评定过的各输入量的标准不确定度列于表 A.1。

输入量名称	标准不确定度	相对标准不确定度	备注
极限荷载	1.16kN	0.577%	主要来源于拉力试验机最大允许误差
面积	9.07 mm <sup>2</sup>	2.88%	主要来源于公称直径的允许偏差。
样品的不均匀性	5.38 MPa	0.841%	/
数值修约	1.44 MPa	0.226%	/

### A.6 合成标准不确定度

由于极限荷载和面积是乘除关系,因此合成可以采用绝对标准不确定度乘灵敏系数的方法,也可以采用相对不确定度直接计算的方法。用相对不确定度进行合成更简单些,且各输入量之间可以视为不相关,则合成相对标准不确定度可以按下式计算

$$\begin{aligned} u_r &= \sqrt{u_\delta^2 + u_{A,r}^2 + u_{x,r}^2 + u_{s,r}^2} \quad (\text{A-14}) \\ &= \sqrt{(0.577\%)^2 + (2.88\%)^2 + (0.841\%)^2 + (0.226\%)^2} \\ &= 3.06\% \end{aligned}$$

式中:

绝对标准不确定度为

$$u = xu_r = 640 \times 3.06\% = 20\text{MPa}$$

### A.7 扩展不确定度:

取  $k = 2$ , 则扩展不确定度为:

$$U = ku = 2u = 40\text{MPa}$$

### A.8 结果的表示

两根钢筋抗拉强度的检测结果均为:

$$R = x \pm U = (640 \pm 40)\text{MPa}, \quad k = 2。$$

## A.9 分析及说明

从列表中可以看出，测量结果的不确定度主要来自于公称面积的引入带来的不确定度。

在不确定度评定过程中，有些机构将样品不均匀性的不确定度放在极限荷载中予以考虑，并且由于带肋钢筋的面积均为公称面积，所以不论将样品的不均匀性放在抗拉强度中还是放在极限荷载中予以考虑，其不确定度数值是相同的。但是对于光圆钢筋等按实际面积进行计算时，由于钢筋抗拉强度的测试是破坏性的，将样品的不均匀性分别按极限荷载和面积分别考虑，应该是不妥的，样品的不均匀性应按在最终的抗拉强度的分量中予以考虑。

## 附录 B 混凝土立方体抗压强度的不确定度评定

### 混凝土立方体抗压强度的不确定度评定

#### B.1 概述:

B.1.1 被测对象: 一组规格为 100mm×100mm×100mm 的混凝土立方体试块, 每组 3 块, 以 3 块的平均值作为最终结果。

B.1.2 检测参数: 抗压强度。

B.1.3 依据标准: 依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2016 进行测试。

B.1.4 测试过程: 在温度 (20℃±2) 的环境下, 成型 100mm×100mm×100mm 的混凝土立方体抗压强度试块 1 组, 静止一天后拆模, 然后放置在规定标准养护条件下养护至 28d 后取出, 将试件表面与上下承压板面擦拭干净, 测量混凝土试块的边长、不平整度和不垂直度, 边长测量时用量程为 300mm, 分度值为 1mm 的钢直尺测量, 精确至 1mm, 当实测边长与公称边长之差小于 1mm 时, 按公称尺寸进行计算, 并且当不平整度和不垂直度符合要求后, 将符合要求的混凝土试块置于压力试验机进行加荷试验, 于规定的加荷速率下进行加荷, 直至试块破坏, 记录试块破坏时的最大压力 P, 计算出混凝土试块的抗压强度。

#### B.1.5 以往资料

参考以往混凝土试块的抗压强度测定值, 样品为 100mm×100mm×100mm 的混凝土立方体试块, 换算成 150mm×150mm×150mm 立方体试件计算抗压强度, 分别为:

序号	换算成 150mm 立方体试件抗压强度标准值 (MPa)			
	1#	2#	3#	平均值
1	42.9	42.0	42.8	42.6
2	42.9	40.5	38.1	40.5
3	39.0	41.6	42.8	41.1
4	40.8	42.1	45.6	42.8
5	41.3	42.6	40.1	41.3
6	42.3	39.7	44.6	42.2
7	43.4	40.5	40.2	41.4
8	42.9	38.6	43.7	41.7
9	40.9	42.6	42.2	41.9
10	40.8	40.4	42.8	41.3

### B.1.6 评定要求

对混凝土抗压强度检测结果的不确定度进行评定。

### B.2 被测量的测量模型

根据标准的要求，混凝土抗压强度按式 B-1 计算

$$f = \frac{P}{A} \quad (\text{B-1})$$

式中： $f$  为混凝土抗压强度，MPa；

$P$  为极限荷载，kN；

$A$  为受力面积， $\text{mm}^2$ 。

### B.3 被测量的不确定度来源的分析

由上述分析可以看出，抗压强度不确定度的分量包括：面积引起的不确定度分量  $u_A$ ，压力测量不确定度分量  $u_P$ ，样品不均匀性分量  $u_{(\delta)}$ 。

### B.4 各输入量不确定度分量及标准不确定度的计算

#### B.4.1 面积引起的不确定度分量

混凝土试块为正方体，其受压面为正方形，实际测量时是测量试块的边长，两个边长的乘积即为受压面的面积。影响边长测量结果的不确定度分量包括样品的不平度和不垂直度引起的不确定度分量，尺子本身带来的不确定度分量；人员读数引起的不确定度分量；数值修约带来的不确定度分量。由于混凝土试块成型前对每个试模的不平度和不垂直度都进行了测量，不符合的试模剔除，不平度、不垂直度引起的不确定度分量可以忽略不计。

边长测量时所用 300mm 钢板尺的最大示值误差为 0.10 mm，按 B 类评定，属于矩形分布，因此由钢板尺的最大允差带来标准不确定度为：

$$u_{L1} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ mm} \quad (\text{B-2})$$

其相对标准不确定度为：

$$u_{L1,r} = \frac{u_{L1}}{L} \times 100\% = \frac{0.058}{100} \times 100\% = 0.058\% \quad (\text{B-3})$$

读数引起的不确定度，该钢板尺量程为 300mm，分度值为 1mm，可以估读至 0.5 个分度值，即 0.5 mm，所测混凝土的边长为 100mm，按均匀分布，采用 B 类评定，则读数引起的不确定度为：

$$u_{L2} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ mm} \quad (\text{B-4})$$

$$u_{L2,r} = \frac{0.29}{100} \times 100\% = 0.29\% \quad (\text{B-5})$$

数值修约引起的不确定度，按 GB/T 50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》要求，混凝土边长的测量精确至 1mm，则数值修约引起的不确定度按 B 类评定，

$$u_{L3} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ mm}^2 \quad (\text{B-6})$$

$$u_{L3,r} = \frac{0.29}{100} \times 100\% = 0.2 \quad (\text{B-7})$$

由于边长测量时，所用钢板尺的最大允差，人员读数和数值修约三个不确定度分量彼此无关，所以边长测量的相对标准不确定度为：

$$u_{L,r} = \sqrt{u_{L1,r}^2 + u_{L2,r}^2 + u_{L3,r}^2} = 0.414\% \quad (\text{B-8})$$

由于承压面的面积为两个边长的乘积，两个边长测量过程有一定的相关性，为了避免确定相关系数，将其视为正相关，则面积的相对标准不确定度为

$$u_{A,r} = 2u_{L,r} = 0.83\% \quad (\text{B-9})$$

#### B.4.2 压力引起的不确定度分量

影响压力测量结果的不确定度分量包括试验机本身带来的不确定度分量、人员读数引起的不确定度分量、加荷速度引起的不确定度分量。由于试验在规定速率范围内进行，其引起的不确定度分量可以忽略不计。

YE-3000 液压式压力试验机检定合格，其示值误差小于  $\pm 1.0\%$ ，按  $\pm 1.0\%$  计算，又其服从矩形分布，则试验机的示值误差引入的不确定度按 B 类进行评定，其相对不确定度为：

$$u_{P1,r} = \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.58 \quad (\text{B-10})$$

该试验机度盘量程为 3000kN，分度值为 5kN，可以估读至  $\pm 0.2$  个分度值，即  $\pm 1$  kN，所测混凝土对应的压力值为 968kN，按矩形分布，采用 B 类评定，则读数引起的不确定度为：

$$u_{P2} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.58 \text{ (kN)} \quad (\text{B-11})$$

$$u_{P2,r} = \frac{0.58}{968} \times 100\% = 0.06\% \quad (\text{B-12})$$

由于试验机示值误差和读数引起的不确定度分量彼此无关，则压力引起的相对不确定度为：

$$u_{P,r} = \sqrt{u_{P1,r}^2 + u_{P2,r}^2} = 0.58\% \quad (\text{B-13})$$

#### B.4.3 样品的不均匀性引起的不确定度

按照以往提供资料将混凝土试块分为 10 组，每组 3 块的测试。采用合并样本标准差公式计算，其结果为：

$$s_p(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}{m(n-1)}} = 1.91 \quad (\text{B-14})$$

$$s(\bar{x}) = \frac{s_p(x_k)}{\sqrt{N}} = 1.10 \quad (\text{B-15})$$

$$u_{sp} = \frac{s(\bar{x})}{x} = 2.64\% \quad (\text{B-16})$$

### B.5 各输入量的不确定度汇总表

为了便于合成标准不确定度的计算，将上述评定过的各输入量的标准不确定度列于表 B.1。

输入量名称	相对标准不确定度	备注
面积	0.83%	主要来源于设备读数及数值修约。
压力	0.58%	主要来源于压力机的示值误差。
样品的不均匀性	2.64%	/

### B.6 合成标准不确定度

按照抗压强度的数学模型，采用相对不确定度直接计算的方法，且各输入量之间可以视为不相关，则合成相对标准不确定度可以按下式计算：

$$u_{f,r} = \sqrt{u_{A,r}^2 + u_{P,r}^2 + u_{f,r}^2} = \sqrt{(0.83\%)^2 + (0.58\%)^2 + (2.64\%)^2} = 2.83\% \quad (\text{B-17})$$

$$u_f = 41.7 \times 2.83\% \quad (\text{MPa}) \quad (\text{B-18})$$

### B.7 扩展不确定度

取包含因子 k=2，则扩展不确定度为：

$$U = 2u_f = 2.4 \text{ (MPa)} \quad (\text{B-19})$$

### B.8 测量结果的表示

混凝土的抗压强度测试结果为：(41.7±2.4) MPa，包含因子 k=2

或 混凝土的抗压强度测试结果为：f = 41.7 MPa，U = 2.4 MPa，k=2

### B.9 分析及说明

从上述的分析过程可以看出，在测量混凝土抗压强度过程中，设备对于检测

结果的不确定度贡献较小，而样品的不均匀性带来的检测结果不确定度贡献最大，通常不均匀性包括样品的制备，养护过程及检测人员的操作等。

## 附录 C 保温材料导热系数测量不确定度的评定

### 保温材料导热系数测量不确定度的评定

#### C.1 概述

保温材料 EPS 板的导热系数试验依据 GB/T10294-2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》进行,本文分析了 EPS 板导热系数测量不确定度的来源,利用测量获得的实验结果及其他资料,评定了测量结果的不确定度。

C.1.1 依据: GB/T 10294-2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》; JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》。

C.1.2 测量原理: 在稳态条件下,在具有平行表面的均匀板状试件内,建立类似于以两个平行的温度均匀的平面为界的无限大平板中存在的一维的均匀热流密度,测量结果以两块 EPS 板导热系数平均值表示。

C.1.3 试样规格尺寸: 300mm×300mm×25mm。

C.1.4 环境条件: 温度为 (23±2)℃,相对湿度 (50±5)%。

C.1.5 检测设备: CD-DR3030 导热系数测定仪:冷板温度 15℃,热板温度 35℃,计量面积为 0.0225 m<sup>2</sup>; 游标卡尺,精度为 0.02mm。

#### C.2 建立测量模型

$$\lambda = \frac{\Phi \times d}{A \times (T_1 - T_2)} \quad (C-1)$$

式中:  $\lambda$ —导热系数, W/(m·K);

$\Phi$ ——加热单元计量部分的平均热流量, W;

$d$ ——试件平均厚度, m;

$A$ ——计量面积, m<sup>2</sup>;

$T_1$ ——试件热面温度平均值, K;

$T_2$ ——试件冷面温度平均值, K;

#### C.3 不确定度来源分析

测量过程引入不确定度的主要来源有:

- (1) 在相同条件下重复测量引入的不确定度;
- (2) 导热系数测定仪校准引入的不确定度;
- (3) 导热系数测定仪分辨力引入的不确定度;
- (4) 加热单元计量部分的平均加热功率引入的不确定度;

- (5) 游标卡尺引入的不确定度；
- (6) 计量面积引入的不确定度；
- (7) 温度引入的不确定度；
- (8) 绝热材料导热系数标准板引入的不确定度。

#### C.4 测量不确定度分量的评定

##### C.4.1 A 类不确定度评定

采用相同的测量体系平行测量了 10 次 EPS 板导热系数，测量所得导热系数数值如表 1 所示。

表 1 EPS 板导热系数测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
导热系数 W/(m·K)	0.0371	0.0370	0.0367	0.0375	0.0370	0.0366	0.0369	0.0372	0.0377	0.0367

测量重复性以标准偏差表示，按贝塞尔公式计算：

$$u(x) = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{9}} = 0.00035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \quad (\text{C-2})$$

$$u_A = \frac{u}{\sqrt{2}} = \frac{0.00035}{\sqrt{2}} = 0.00025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \quad (\text{C-3})$$

EPS 板导热系数平均值为 0.0371 W/(m·K)，相对标准不确定度为：

$$u_{A,\text{rel}} = \frac{0.00025}{0.0371} \times 100\% = 0.67\% \quad (\text{C-4})$$

##### C.4.2 B 类不确定度评定

B 类标准不确定度评定包括仪器的准确度、仪器分辨力、平均加热功率、游标卡尺、计量面积、温度和标准板引入不确定度的评定。

###### C.4.2.1 导热系数测定仪校准引入的不确定度

导热系数测定仪的示值误差为系统效应，本次试验使用的 CD-DR3030 导热系数测定仪，制造厂的说明书给出试验准确度为不大于 ±3%，按均匀分布估计，由此导致的导热系数测量结果的相对标准不确定度分量为：

$$u_{B1,\text{rel}} = \frac{3\%}{\sqrt{3}} \times 100\% = 1.73\% \quad (\text{C-5})$$

###### C.4.2.2 导热系数测定仪分辨力引入的不确定度

CD-DR3030 导热系数测定仪数字显示仪器的分辨力为 0.0001W/(m·K)，则区间半宽度为 0.00005W/(m·K)，按均匀分布估计，由分辨力引入的标准不确定度为：

$$u_{B2} = \frac{0.00005}{\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-5} W / (m^2 K) \quad (C-6)$$

相对标准不确定度为:

$$u_{B1,rel} = \frac{2.89 \times 10^{-5}}{0.0371} \times 100\% = 0.078\% \quad (C-7)$$

#### C.4.2.3 加热单元计量部分的平均加热功率引入的不确定度

标准 GB/T 10294-2008 中规定测量加热器功率的误差在全范围内均应在 0.1% 之内, 则区间半宽度为 0.05%, 按均匀分布估计, 由加热单元计量部分的平均加热功率引入的相对标准不确定度为:

$$u_{B3,rel} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} \times 100\% = 0.029\% \quad (C-8)$$

#### C.4.2.4 游标卡尺引入的不确定度

##### (1) 游标卡尺校准引入的不确定度

试样厚度由游标卡尺测量, 为 25.02mm, 通过游标卡尺的检定证书可知其在 0~70mm 测量范围内示值误差不超过  $\pm 0.02\text{mm}$ , 按均匀分布估计, 由游标卡尺示值误差引入的标准不确定度为:

$$u_{B4} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.0115\text{mm} \quad (C-9)$$

相对标准不确定度为:

$$u_{B4,rel} = \frac{0.0115}{25.02} \times 100\% = 0.046\% \quad (C-10)$$

##### (2) 读数误差引入的不确定度

游标卡尺的分度值为 0.02mm, 读值误差为 0.02mm, 按均匀分布估计, 由游标卡尺读值误差引入的标准不确定度为:

$$u_{B5} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.0115\text{mm} \quad (C-11)$$

相对标准不确定度为:

$$u_{B5,rel} = \frac{0.0115}{25.02} \times 100\% = 0.046\% \quad (C-12)$$

##### (3) 两者的合成标准不确定度为:

$$u_{B45,rel} = \sqrt{u_{B4,rel}^2 + u_{B5,rel}^2} = \sqrt{(0.046\%)^2 + (0.046\%)^2} = 0.065\% \quad (C-13)$$

#### C.4.2.5 计量面积引入的不确定度

计量面积为  $0.0225 \text{ m}^2$ ，误差为  $\pm 0.0001 \text{ m}^2$ ，按均匀分布估计，由计量面积引入的标准不确定度为：

$$u_{B6} = \frac{0.0001}{\sqrt{3}} = 0.000058 \text{ m}^2 \quad (\text{C-14})$$

相对标准不确定度为：

$$u_{B6, \text{rel}} = \frac{0.000058}{0.0225} \times 100\% = 0.2\% \quad (\text{C-15})$$

#### C.4.2.6 温度引入的不确定度

标准 GB/T 10294-2008 中规定测量温度和温差系统的灵敏度和准确度应不低于温差的 0.2%，则区间半宽度为 0.1%，冷热板温差为  $20^\circ\text{C}$ ，按均匀分布估计，由冷热板温度引入的标准不确定度为：

$$u_{B7} = \frac{20 \times 0.2\%}{2 \times \sqrt{3}} = 0.0115 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{C-16})$$

相对标准不确定度为：

$$u_{B7, \text{rel}} = \frac{0.0115}{20} \times 100\% = 0.058\% \quad (\text{C-17})$$

#### C.4.2.7 绝热材料导热系数标准板引入的不确定度

导热系数测定仪使用标准板，根据标准板证书的信息，扩展不确定度为 2.5%，95%置信度。95%置信概率按正态分布考虑，其包含因子为  $k=1.96$ 。

$$u_{B8, \text{rel}} = \frac{2.5\%}{1.96} = 1.28\% \quad (\text{C-18})$$

### C.5 合成标准不确定度

合成相对标准不确定度按下式计算：

$$\begin{aligned} u_{c, \text{rel}} &= \sqrt{u_{A, \text{rel}}^2 + u_{B1, \text{rel}}^2 + u_{B2, \text{rel}}^2 + u_{B3, \text{rel}}^2 + u_{B4, \text{rel}}^2 + u_{B5, \text{rel}}^2 + u_{B6, \text{rel}}^2 + u_{B7, \text{rel}}^2 + u_{B8, \text{rel}}^2} \\ &= \sqrt{0.67\%^2 + 1.73\%^2 + 0.078\%^2 + 0.029\%^2 + 0.071\%^2 + 0.26\%^2 + 0.058\%^2 + 1.28\%^2} \\ &= 2.3\% \end{aligned} \quad (\text{C-19})$$

$$\text{合成标准不确定度 } u_c = u_{c, \text{rel}} \times \lambda = 2.3\% \times 0.0371 = 0.00086 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{K}) \quad (\text{C-20})$$

### C.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.00086 = 0.0018 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{K}) \quad (\text{C-21})$$

### C.7 结果报告

EPS 板导热系数检测结果为

$$\lambda = (0.0371 \pm 0.0018) \text{ W / (m}\cdot\text{K)}, \quad k = 2 \quad (\text{C-22})$$

## 附录 D 水泥烧失量检测结测量不确定度评定

### 水泥烧失量检测结测量不确定度评定

#### D.1 概述

##### D.1.1 测量方法

依据 GB/T 176-2017 《水泥化学分析方法》。

##### D.1.2 评定依据

JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》。

##### D.1.3 被测对象

水泥化学分析中烧失量的测定（灼烧差减法）。

##### D.1.4 测试仪器和设备

分析天平(精确至 0.0001g)；马弗炉：隔焰加热炉，在炉膛外围进行电阻加热，应使用温度控制器，准确控制炉温，并定期进行校验。

##### D.1.5 测试步骤

称取约 1g 试样，精确至 0.0001g，置于已灼烧至恒重的瓷坩埚中，将盖斜置于坩埚上，放在马弗炉内从低温开始逐渐升高温度，在(950±25)℃下灼烧 15～20min，取出坩埚置于干燥器中冷却至室温，称量。反复灼烧，直至恒重。烧失量的试验次数为两次，用两次试验结果的平均值表示测定结果。两次试验结果如表 1。

表 1 水泥烧失量的测试结果

次数 $n$	1	2	平均值
烧失量 %	2.47	2.50	2.49

#### D.2 建立数学模型

烧失量的质量百分数  $X_{LOI}$ ：

$$X_{LOI} = \frac{m_7 - m_8}{m_7} \times 100 \quad (D-1)$$

$X_{LOI}$  —— 烧失量的质量百分数，%；

$m_7$  —— 试料的质量，g；

$m_8$  —— 灼烧后试料的质量，g。

#### D.3 测量不确定度的来源及分析

基准法测定水泥烧失量不确定度的主要来源包括：

- ①测量重复性引入的不确定度；
- ②称量引入的不确定度；
- ③恒重引入的不确定度；
- ④人员操作引入的不确定度；
- ⑤设备引入的不确定度。

根据 GB/T 176-2017《水泥化学分析方法》第 6.41 条款，水泥化学分析方法及 X 射线荧光分析方法测定结果的重复性限和再现性限中烧失量的重复性限为 0.15%，再现性限为 0.25%。

本次检测为依照检测方法要求，在同一检测方法，相同的人员，操作条件，短时间内进行的两次测量，其两次测量的差值符合重复性限的要求。

那么可以采用检测方法中的再现性限进行不确定度评定。再现性限中把检测方法、人员、设备、环境等的影响都包含了。

#### D.4 测量不确定度的评定

- 1) 单次测量的标准不确定度为：

$$u_A = \frac{R}{2\sqrt{2}} = \frac{0.25\%}{2\sqrt{2}} = 0.088\% \quad (\text{D-2})$$

- 2) 两次测量的平均值的标准不确定度为：

$$u_{A'} = \frac{u_A}{\sqrt{2}} = \frac{0.088\%}{\sqrt{2}} = 0.062\% \quad (\text{D-3})$$

#### D.5 扩展不确定度的

- 取  $k = 2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k u_{A'} = 2 u_{A'} = 2 \times 0.062\% = 0.12\% \quad (\text{D-4})$$

#### D.6 结果的表示

$$X_{LOI} = 2.49\% , U = 0.12\% , k = 2 \quad (\text{D-5})$$

## 附录 E 室内环境空气中 TVOC 浓度测量不确定度评定

### 室内环境空气中 TVOC 浓度测量不确定度评定

#### E.1 概述

E.1.1 被测对象：室内环境空气

E.1.2 检测参数：TVOC 浓度

E.1.3 依据标准：GB 50325-2010（2013 年版）《民用建筑工程室内环境污染控制规范》附录 G

E.1.4 测试过程：将 Tenax-TA 吸附管与空气采样器入气口垂直连接，调节流量在 0.5L/分钟，采集 20 分钟，记录采样温度和大气压。将采样后的吸附管置于热解吸直接进样装置中，经温度范围为 280℃~300℃充分解吸后，使解吸气体直接由进样阀快速进入气相色谱仪进行色谱分析，以保留时间定性，以峰面积定量。

E.1.4 检测结果：室内环境空气 TVOC 浓度（甲苯）为 0.132mg/m<sup>3</sup>

#### E.2 被测量的测量模型

环境空气中 TVOC 浓度为各组分浓度的合计值，包括苯（1）、甲苯（2）、乙苯（3）、对/间二甲苯（4）、邻二甲苯（5）、苯乙烯（6）、乙酸丁酯（7）及十一烷（8），未识别峰（9）以甲苯计。

以甲苯举例，相应浓度按式（1）计算：

$$C_2 = \frac{m}{V_0} \quad (\text{E-1})$$

式中：C<sub>2</sub> ——环境空气中甲苯的浓度，mg / m<sup>3</sup>；

m ——测得样品中甲苯的含量，μg；

V<sub>0</sub> ——换算成标准状态下的采样体积，L

#### E.3 被测量的不确定度来源的分析

由测量模型可以看出室内环境空气中 TVOC 浓度的不确定度主要来源于所测样品中 TVOC 含量带来的不确定度及采样体积带来的不确定度。

#### E.4 各输入量不确定度分量及标准不确定度分析及其计算

E.4.1 换算成标准状态下的采样体积 V<sub>0</sub> 的相对标准不确定度  $u_{rel}(V_0)$

E.4.1.1 样品标准采样体积数学模型：

$$V_0 = Q \times t \times \frac{T_0}{T} \times \frac{P}{P_0} \quad (\text{E-2})$$

式中：V<sub>0</sub> ——换算成标准状态下的采样体积，L；

Q —— 空气采样器流量，L / min；

- t —— 采样器采样时间, min;  
 $T_0$  —— 标准状态绝对温度, K;  
 T —— 采样时的绝对温度, (现场测得摄氏温度+273), K;  
 P —— 空气采样时的大气压;  
 $P_0$  —— 标准状态大气压。

#### E.4.1.2 方差合成

由 (E-2) 式可推出标准采样体积的相对标准不确定度公式:

$$u_{rel(V_0)} = \sqrt{u_{rel(Q)}^2 + u_{rel(t)}^2 + u_{rel(T)}^2 + u_{rel(P)}^2}$$

式中:  $u_{rel(V_0)}$  —— 标准采样体积的相对标准不确定度;

$u_{rel(Q)}$  —— 采样器流量的相对标准不确定度;

$u_{rel(t)}$  —— 采样时间的相对不确定度;

$u_{rel(T)}$  —— 采样温度的相对不确定度;

$u_{rel(P)}$  —— 气压的相对标准不确定度。

#### E.4.1.3 不确定度各分量的计算

流量示值不确定度  $u_{rel(Q)}$ : 采样器在 0~10L / min 流量量程的示值扩展不确定度为 1.8%(k=2), 则

$$u_{rel(Q)} = \frac{1.8\%}{2} = 0.900\% \quad (\text{E-3})$$

计时不确定度  $u_{rel(t)}$ : 采样计时器示值允许误差为 0.05%(k= $\sqrt{3}$ ),

$$u_{rel(t)} = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.0289\% \quad (\text{E-4})$$

气压不确定度  $u_{rel(P)}$ : 气压计示值扩展不确定度为 0.3%(k=2), 则

$$u_{rel(P)} = \frac{0.3\%}{2} = 0.150\% \quad (\text{E-5})$$

温度引入的不确定度  $u_{rel(T)}$ : 温度计的示值允许误差为  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , 标准状态温度为 273K, 其相对误差为 0.0683%(k= $\sqrt{3}$ ), 则

$$u_{\text{rel}(T)} = \frac{0.0683\%}{\sqrt{3}} = 0.0394\% \quad (\text{E-6})$$

空气标准采样体积的相对合成不确定度:

$$u_{\text{rel}(V_0)} = \sqrt{u_{\text{rel}(Q)}^2 + u_{\text{rel}(t)}^2 + u_{\text{rel}(T)}^2 + u_{\text{rel}(P)}^2} = 0.914\% \quad (\text{E-7})$$

#### E.4.2 实验室测定 Tenax 吸附管中甲苯含量的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}(m)}$

甲苯含量  $m$  的不确定度由两部分组成:

- (1) 标准溶液不确定度及配制标准系列时产生的相对标准不确定度  $u_{\text{rel}1}$ ;
- (2) 根据仪器的检测数据拟合工作曲线求  $C$  时产生的不确定度  $u_{\text{rel}2}$ 。

##### E.4.2.1 配制标准工作管时产生的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}1}$

甲苯的标准溶液配制: 准确称取 1g 色谱纯甲苯, 用稀释溶剂定容在 100ml 容量瓶中。从证书上查得色谱纯甲苯的纯度为大于 99.5%, 取三角分布  $k=\sqrt{6}$ ,

甲苯标准溶液浓度引入的标准不确定度  $u_{\text{rel}(C_s)}$ :

$$u_{\text{rel}(C_s)} = \frac{0.5\%}{\sqrt{6} \times 99.5\%} \times 100\% = 0.205\% \quad (\text{E-8})$$

天平称量引入的标准不确定度  $u_{\text{rel}(m_s)}$

从证书上查得天平的允许误差为 0.0001g, 按矩形分布处理, 其相对标准不确定度为

$$u_{\text{rel}(m_s)} = \frac{0.0001}{\sqrt{3} \times 1.0} \times 100\% = 0.0058\% \quad (\text{E-9})$$

将定容的甲苯标准液使用 1 个 10ml 和 1 个 20ml 单标移液管和 2 个 100ml 容量瓶逐级稀释为 200  $\mu\text{g}/\text{ml}$  的甲苯标准工作液。

100ml 容量瓶引入的不确定度

$$u_{\text{rel}(100)} = \frac{0.20}{\sqrt{3} \times 100} \times 100\% = 0.15\% \quad (\text{E-10})$$

10ml 单标移液管引入的不确定度

$$u_{\text{rel}(10)} = \frac{0.04}{\sqrt{3} \times 10.0} \times 100\% = 0.231\% \quad (\text{E-11})$$

20ml 单标移液管引入的不确定度

$$u_{\text{rel}(v20)} = \frac{0.06}{\sqrt{3} \times 20.0} \times 100\% = 0.173\% \quad (\text{E-12})$$

标准溶液配制引入的相对标准不确定度为

$$u_{\text{rel}(V_s)} = \sqrt{u_{\text{rel}(v10)}^2 + u_{\text{rel}(v20)}^2 + 2u_{\text{rel}(v100)}^2} = 0.331\% \quad (\text{E-13})$$

将吸附管安装在进样装置上, 通以 100 mL/min 的惰性气体, 使用 1  $\mu\text{L}$  和 10  $\mu\text{L}$  微量注射器将 0.2、0.4、2、4  $\mu\text{L}$  的标准溶液通过隔膜注入各吸附管。

由于目前无针对微量注射器的检定、校准规程, 实验室亦无法对其进行校准, 估计测量误差在  $\pm 2\%$  内, 以均匀分布,

$$u_{\text{rel}(V)} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} \times 100\% = 1.15\% \quad (\text{E-14})$$

标准溶液吸附管制备引入的相对标准不确定度

$$u_{\text{rel}(V)} = \sqrt{4u_{\text{rel}(V)}^2} = 2.31\% \quad (\text{E-15})$$

标准溶液配制、稀释和标准管制备引入的相对标准不确定度

$$u_{\text{rel}(V)} = \sqrt{u_{\text{rel}(V)}^2 + u_{\text{rel}(V)}^2 + u_{\text{rel}(V)}^2 + u_{\text{rel}(V)}^2} = 2.34\% \quad (\text{E-16})$$

#### E.4.2.2 标准工作管含量和峰面积校准曲线求 m 时产生的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}2}$

对甲苯标准系列各浓度重复进样 3 次, 测定峰面积 Y。根据公式  $Y_i = bC_i + a$ , 对应峰面积  $Y_i$  和浓度  $C_i$ , 用 Excel 线性回归计算。例如: 标准曲线的截距  $a = 1.3819 \times 10^8$ , 斜率为  $b = 2.4117 \times 10^6$ , 标准残差  $S = 2.962 \times 10^6$ , 按实验方法对样品管单次测定, 由线性方程求得样品管中甲苯的含量为 1.212  $\mu\text{g}$ 。则拟合曲线求 x 时产生的标准不确定度为

$$u_2 = \frac{s}{b} \sqrt{\frac{1}{P} + \frac{1}{n} + \frac{(C - \bar{C}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C}_i)^2}} = 0.0211 \quad (\text{E-17})$$

其中  $\bar{C}_i$  为不同浓度标准溶液的平均值; n 为标准溶液的测定总次数,  $n=15$ ;

P 为样品的测定次数,  $P=1$ 。其相对标准不确定度

$$u_{\text{rel}2} = \frac{0.0211}{1.212} \times 100\% = 1.74\% \quad (\text{E-18})$$

#### E.4.2.3 吸附管中含量浓度 m 的相对标准不确定度

$$u_{\text{rel}(m)} = \sqrt{u_{\text{rel}1}^2 + u_{\text{rel}2}^2} = 2.919\% \quad (\text{E-19})$$

#### E.5 合成相对标准不确定度

环境空气中甲苯浓度测定的相对标准不确定度:

$$u_{\text{rel}(C_2)} = \sqrt{u_{\text{rel}(m)}^2 + u_{\text{rel}(V_0)}^2} = 3.059\% \quad (\text{E-20})$$

$$u_{C_2} = u_{\text{rel}(C_2)} \times C_2 = 0.00404 \text{ mg/m}^3 \quad (\text{E-21})$$

#### E.6 扩展不确定度

根据自由度和置信水平, 取包含因子  $k = 2$  (95%置信度), 则

$$U = k \times u_{C_2} = 0.008 \text{ mg/m}^3 \quad (\text{E-22})$$

相对扩展不确定度为 6.1%。

#### E.7 结果的表示

气相色谱法测定环境空气中 TVOC 浓度(甲苯)的测定结果表示为:

$$C = (0.132 \pm 0.008) \text{ mg/m}^3, \quad k = 2$$

(E-23)

#### E.8 分析及说明

参照环境空气中甲苯测定的相对合成标准不确定度产生过程, 可计算其他参数的相对合成标准不确定度, 则计算 TVOC 浓度的相对不确定度计算公式为

$$u_{\text{rel}(C_0)} = \sqrt{u_{\text{rel}(C_1)}^2 + 2u_{\text{rel}(C_2)}^2 + u_{\text{rel}(C_3)}^2 + u_{\text{rel}(C_4)}^2 + u_{\text{rel}(C_5)}^2 + u_{\text{rel}(C_6)}^2 + u_{\text{rel}(C_7)}^2 + u_{\text{rel}(C_8)}^2 + u_{\text{rel}(C_9)}^2}$$

同样, 亦可根据总的 TVOC 测定浓度计算出 TVOC 的扩展不确定度。

## 附录 F 沥青混合料马歇尔稳定度测量不确定度评定

### 沥青混合料马歇尔稳定度测量不确定度评定

#### F.1 试验原理和过程

- 1、依据 JTG E20-2011 《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行测量。
- 2、沥青混合料马歇尔稳定度是指对标准制作的沥青混合料圆柱体试件在 60℃ 温度下用规定速度进行破坏性试验, 测定其在热状态下所能承受的最大压力和变形量。

#### F.2 建立测量模型

$$Y = f(T, M, d) \quad (\text{F-1})$$

#### F.3 测量不确定度的评定

- (1) 重复性引入的标准不确定度分量  $u(x)$

- (2) 试验温度测量引入的不确定度分量  $u(T)$ ；
- (3) 马歇尔试验仪引入的不确定度分量  $u(M)$ ；
- (4) 试件的直径及高度引入的不确定度分量  $u(d)$ 、 $u(h)$ 。

### F.3.1 不确定度 A 类评定

重复性引入的标准不确定度分量  $u(x)$  如下：

平行试验	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
稳定度 (kN)	13.05	14.27	12.86	13.45	12.44	12.58	13.01	12.25	12.73	12.55	12.92

采用贝塞尔公式法计算标准不确定度：

$$u(x) = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{9}} = 0.587(\text{kN}) \quad (\text{F-2})$$

### F.3.2 不确定度 B 类评定

#### F.3.2.1 由试验温度引入的标准不确定度 $u(T)$

试验温度最大允许误差为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，假设试验温度为  $60^\circ\text{C}$ ，以均匀分布估计，则：

$$u(T) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.289 \quad (\text{F-3})$$

以相对不确定度计表示为：

$$u_{rel}(T) = \frac{0.289}{60} = 4.82 \times 10^{-3} \quad (\text{F-4})$$

假设马歇尔稳定度为  $12.92\text{kN}$ ，则由试验温度引入的马歇尔稳定度的不确定度为：

$$u(T) = 4.82 \times 10^{-3} \times 12.92 = 0.623(\text{kN}) \quad (\text{F-5})$$

#### F.3.2.2 马歇尔稳定度测定仪分辨力引入的不确定度 $u(M_1)$

马歇尔稳定度仪分辨力  $0.01\text{kN}$ ，则

$$u(M_1) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-3} \quad (\text{F-6})$$

马歇尔稳定度测定仪校准带来的不确定度  $u(M_2)$

查马歇尔稳定度测定仪的校准证书，测量结果的不确定度：

$$U_{rel}=0.4\% \quad k=2, \text{ 则 } u_{rel}(M_2)=0.2\% ,$$

$$u(M_2)=0.2\% \times 12.92=0.0258(\text{kN})$$

### F.3.2.3 试件的直径及高度引入的不确定度分量 $u_{rel}(d)$ 和 $u_{rel}(h)$

严格按照试验规程操作，室内制作的试件必须符合高度及直径的要求，否则应予废弃，因此，假定试件的直径及高度引入的不确定度可忽略不计。

### F.4 马歇尔稳定度合成不确定度

由于 $u(M_1)$ 、 $u(M_2)$ 、 $u(T)$ 、 $u(x)$ 四个分量之间彼此独立，则马歇尔稳定度的合成不确定度为：

$$\begin{aligned} u(M) &= \sqrt{u^2(T) + u^2(M_1) + u^2(M_2) + u^2(x)} \\ &= \sqrt{(0.623)^2 + (2.89 \times 10^{-3})^2 + (0.0258)^2 + (0.587)^2} \\ &= 0.86\text{kN} \end{aligned} \quad (\text{F-7})$$

### F.5 马歇尔稳定度的扩展不确定度

$$U = k \times u(M) = 2 \times 0.86 = 1.7 \quad (\text{F-8})$$

### F.6 测量不确定度报告

马歇尔稳定度为 12.9kN，扩展不确定度为  $U=1.7\text{kN}$ ，包含因子  $k=2$ 。

## 附录 G 沥青针入度不确定度评定

### 沥青针入度不确定度评定

#### G.1 概述

G.1.1 被测对象：将沥青样品小心加热，不断搅拌以防局部过热，加热到使样品能够易于流动，加热时间在保证样品充分流动的基础上尽量少。因预计针入度范围为小于 200（以 0.1mm 计），则将试样倒入中盛样皿（ $\phi 55\text{mm} \times 35\text{mm}$ ），浇注的样品要达到试样皿边缘。

G.1.2 检测参数：针入度；

G.1.3 依据标准：依据《沥青针入度测定法》GB/T 4509-2010

G.1.4 试验原理和过程

测试过程：针入度试验是在规定温度和时间内，附加一定质量的标准针垂直贯入沥青试样的深度，以 0.1mm 计。其标准试验条件为温度 25℃，荷重 100g，贯入时间 5s。将注入盛样皿中的试样，在 25℃室温中冷却 1.5h，冷却结束后将移入规定试验温度的恒温水槽中，并保温 1.5h。将已恒温到实验温度的试样皿放在平底玻璃皿中的三脚支架上，用与水浴相同温度的水完全覆盖样品，将平底玻璃皿放置在针入度仪的平台上。慢慢放下针连杆使针尖与试样表面接触，开始试验，读取读数，准确至 0.1mm。平行试验三次，取平均值作为针入度试验结果。

G.1.5 评定要求：对沥青针入度检测结果的不确定度进行评定

#### G.2 建立测量模型

$$A = (\bar{x} + s_x) / \dots \quad (\text{G-1})$$

$$Y = A (b_1 + b_2 + \dots + b_n) + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \quad (\text{G-2})$$

式中：A 为三次针入度平均值；

Y 为沥青针入度；

$b_n$  为操作中由控制条件引入的误差。

#### G.3 被测量的不确定度来源的分析

针入度可能引入误差来源大致包括：

$a_1$ ：针入度仪的位移测量装置的示值允许误差；

$a_2$ ：针沉入试样时间差异引入的误差；

$a_3$ ：检测过程中由于试验温度变化引入的误差；

$a_4$ : 针、连杆和配重砝码质量差异引入的误差;

$b_1$ : 试验人员对针瞄准时引入的误差;

$b_2$ : 针的落点位置引入的误差。

$b_3$ : 盛样皿内部直径不同引入的误差。

$c_1$ : 数显示测量仪器引入的误差。

$c_2$ : 计算修约间隔引入的误差。

(1)  $A(b_1, b_2, \dots, b_n)$  的影响量的大小很难用物理/数学方法分析, 相互间关系很复杂, 只能用 A 类评定, 让 3 个因素同时作用, 通过试验评价它的综合影响。

(2)  $a_3$  用 A 类和 B 类综合的方法。具体描述如下: 保持其它条件不变, 仅改变温度, 在 15 °C、25 °C、30 °C 下, 每个温度各做 3 次试验取平均值, 得到针入度随温度变化的关系式, 再用 B 类方法分析。

(3) 其余都用 B 类评定。

采用检定合格的 EL46-5380 自动针入度仪, 由具有检测资格的试验员, 取同一批材料, 在相邻近的时间内、同一环境下进行重复性试验, 做 10 组试验, 每组 3 次检测获得的数据 (精确至 0.1mm):

#### G.4 不确定度 A 类评定

A 类分量的不确定度可根据检测结果的统计分布进行估计, 由于绝大多数被测值是服从或近似服从正态分布, 因此其检测结果服从由正态分布定义的一些统计分布。又由于在实际工作中不可能做无限次数的测试, 所以将有限次数的测试对标准偏差的估计值称为实验室标准偏差。本次实验室标准偏差的计算方法采用贝塞尔法:

$$s = \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{G-3})$$

计算出各组标准差  $S_j$  见表 1。

表 1 相同温度 (25°C) 针入度试验结果

试验组数	第一次	第二次	第三次	平均值	标准差
1	71.8	72.4	73.0	72.4	0.6000
2	72.1	72.6	72.9	72.5	0.4041

3	71.9	71.5	72.0	71.8	0.2646
4	72.3	72.8	72.5	72.5	0.2517
5	71.8	71.9	72.1	71.9	0.1528
6	72.8	72.9	73.2	73.0	0.2082
7	73.2	73.1	71.9	72.7	0.7234
8	71.6	72.5	72.4	72.2	0.4933
9	71.5	71.9	72.4	71.9	0.4509
10	71.7	72.4	73.3	72.5	0.8021
各组试验结果总平均值				72.3	

为了提高可靠性，本次采用合并样本标准差  $S_p$ ，计算重复性标准偏差的平均值：

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_j^2} = \sqrt{\frac{1}{m(n-1)} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} = 0.483 \quad (\text{G-4})$$

式中：  $n$  为平行试验次数；

$m$  为试验组数。

虽然本次试验在重复条件下进行的规范化测量，测量状态稳定并条件受控，但也需要考虑  $S_j$  的不确定度是否可以忽略。由于测量列的标准差  $S_j$  也是一个变量，所以，计算标准差  $S_j$  的标准差  $\sigma(s)$  为：

$$\sigma(s) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (s_j - \bar{s})^2}{(m-1)}} = 0.221 \quad (\text{G-5})$$

式中：  $\bar{s}$  为标准差之平均值，即  $\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_j$ ；

$m$  为测量列组数；

$S_j$  为第  $j$  组测量列的标准差。

而本次多组试验的标准差估计值

$$\sigma_{\text{估}}(s) = \frac{S_p}{\sqrt{2(n-1)}} = \frac{0.483}{\sqrt{2 \times 2}} = 0.2415 \quad (\text{G-6})$$

式中：  $n$  为测量列的测量次数。

因为  $\sigma(s) < \sigma_{\text{估}}(s)$  表示测量状态稳定，所以高可靠度的  $S_p$  可以应用。

因此 A 类测量标准不确定度  $u(A) = S_p = 0.483$ 。

$$u(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{0.483}{\sqrt{3}} = 0.279(kN)$$

### G.5 不确定度 B 类评定

根据《测量不确定度基本原理和评定方法及在检测和校准中的应用》B 类标准不确定度描述：数字显示式测量仪器，分辨力为  $\delta_x$ ，则  $u(x) = 0.29 \delta_x$ ；量值数字修约时，如修约间隔为  $\delta_x$ ，则  $u(x) = 0.29 \delta_x$ 。本次使用数显测量仪器，其分辨率为 0.1，则带来的标准 B 类测量不确定度：

$$u(c_1) = 0.29 \times 0.1 = 0.029 \quad (G-7)$$

由本次试验计算平均值时小数修约间隔为 0.1，则导致的标准 B 类测量不确定度为：

$$u(c_2) = 0.29 \times 0.1 = 0.029 \quad (G-8)$$

#### G.5.1 计算针入度的位移测量装置引入的不确定度 $u(a_1)$

根据仪器校准证书，区间的半宽度  $a = U = 0.2$ ，取均匀分布  $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u(a_1) = \frac{a}{k} = 0.115 \quad (G-9)$$

#### G.5.2 计算贯入时间差异引入的不确定度 $u(a_2)$ 。

时间误差很小，引起的不确定度也很小，忽略不计，即：

$$u(a_2) = 0. \quad (G-10)$$

#### G.5.3 计算检测过程中由于试验温度变化引入的不确定度 $u(a_3)$ 。

由三组试验回归公式  $Y = At + B$ （见表 2），控温精度  $0.1^\circ\text{C}$ ，得  $\Delta Y = A\Delta t + B = 0.0398 \times 0.1 + 0.8556 = 0.8596$ ，取均匀分布  $k = \sqrt{3}$ ，得：

$$u(a_3) = 0.8596 / \sqrt{3} = \quad (G-11)$$

表 2 不同温度针入度试验结果

试验组数	试验温度	第一次	第二次	第三次	平均值
1	15℃	28.1	27.9	28.3	28.1
2	25℃	71.8	72.4	73.0	72.4
3	30℃	110.3	110.1	110.0	110.1
回归公式	$Y = 0.0398x + 0.8556, R^2 = 0.9991$				

**G.5.4 计算针、连杆和砝码质量差异引入的不确定度  $u(a_4)$ 。**

经检定合格的针、连杆、砝码，对针入度影响很小，可以忽略不计，

即：  $u(a_4)=0$ 。

**G.6 合成标准不确定度评定**

由于各分量不相关，所以合成标准不确定度  $U(Y)$  为：

$$u(Y) = \sqrt{u_A^2 + u_{c_1}^2 + u_{c_2}^2 + u_{a_1}^2 + u_{a_1}^2 + u_{a_2}^2 + u_{a_3}^2 + u_{a_4}^2} = 0.59 \quad (\text{G-12})$$

**G.7 扩展不确定度评定**

根据 JJF 1059.1-2012 中规定，当置信率为 95% 时的扩展不确定度为：

$$U = k u(\bar{Y}) = 2 \times 0.59 = 1.2, \text{ 其中 } k=2 \quad (\text{G-13})$$

**G.8 针入度测量不确定度报告**

测量结果报告：

$$Y = A \pm U = (A \pm 1.2) \text{mm}, \text{ A: 实测值, } k = 2 \quad (\text{G-14})$$

## 附录 H 钢筋保护层厚度测量结果的不确定度评定

### 钢筋保护层厚度测量结果的不确定度评定

#### H.1 试验原理和过程

H.1.1 钢筋保护层厚度定义：被测钢筋外边缘至混凝土表面的最短距离。

H.1.2 钢筋保护层厚度检测依据：《混凝土结构施工质量验收规范》GB50204-2015 附录 E 结构实体钢筋保护层厚度检验，评定依据为《测量不确定度评定与表示》JJF1059.1-2012，参考《钢筋保护层、楼板厚度测量仪校准规范》JJF1224-2009。

H.1.3 测试对象：试件规格为钢筋保护层厚度为 40mm，钢筋规格为直径 16mm、HRB400 级螺纹钢。

H.1.4 测量设备：HILTI 的 PS200S 型钢筋探测仪。

H.1.5 测试过程：按照设备使用说明对钢筋探测仪进行设置和初始化。对试件保护层厚度进行测量。

#### H.2 钢筋保护层厚度测量结果的不确定度评定的数学模型

数学模型：仪器示值  $h$  与试块的实际值  $h_a$  之差，即为测量误差  $\Delta$ 。

$$\Delta = h - h_a \quad (\text{H-1})$$

式中： $h$ ——测量仪器显示厚度值，mm；

$h_a$ ——试块实际厚度值，mm；

$\Delta$ ——保护层厚度测量仪误差，mm。

#### H.3 灵敏系数和合成标准不确定度公式

由于  $h$  与  $h_a$  彼此独立，不相关，所以合成标准不确定度  $u_c$  计算公式可由计算合成标准不确定度的通用公式简化为：

$$u_c = u(\Delta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta}{\partial h}\right)^2 \cdot u^2(h) + \left(\frac{\partial \Delta}{\partial h_a}\right)^2 \cdot u^2(h_a)} = \sqrt{c_1^2 \cdot u^2(h) + c_2^2 \cdot u^2(h_a)} \quad (\text{H-2})$$

其中：灵敏度系数为  $C_i$  分别为：

$$C_1 = \partial \Delta / \partial h = 1 \quad (\text{H-3})$$

$$C_2 = \partial \Delta / \partial h_a = -1 \quad (\text{H-4})$$

即：合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = u(\Delta) = \sqrt{c^2(h) \cdot u^2(h) + c_a^2(h) \cdot u_a^2(h)} \quad (\text{H-5})$$

#### H.4 不确定度来源分析

合成标准不确定度  $u_c$  主要由“与钢筋探测仪相关的不确定度  $u(h)$ ”和“与

试块相关的不确定度  $u(h_a)$ ” 构成。

$u(h)$  由  $u(h_1)$ 、 $u(h_2)$ 、 $u(h_3)$ ，3 个不确定度分量组成。其中：

$u(h_1)$ ：测量重复性引入的不确定度分量；

$u(h_2)$ ：钢筋探测仪分辨力引入的不确定度分量；

$u(h_3)$ ：钢筋探测仪示值误差引入的不确定度分量。

$u(h_{a1})$  由  $u(h_a)$ ，1 个不确定度分量组成。

$u(h_a)$ ：钢筋直径尺寸偏差引入的不确定度分量。

## H.5 标准不确定度评定

### H.5.1 与钢筋探测仪相关的不确定度分量 $u(h)$ 评定

#### H.5.1.1 测量重复性引入的不确定度分量 $u(h_1)$ 评定

可以通过连续测量得到测量列（采用 A 类方法进行评定）。

保护层厚度 40mm，钢筋直径 16mm，用钢筋探测仪进行测量，在重复性条件下连续测量 10 次，得到测量列为：40mm、40mm、41mm、40mm、40mm、41mm、40mm、40mm、40mm、40mm。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 40 \text{ mm} \quad (\text{H-6})$$

$$\text{实验标准差} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.42 \text{ mm} \quad (\text{H-7})$$

$$u(h_1) = s = 0.42 \text{ mm} \quad (\text{H-8})$$

H.5.1.2 由钢筋探测仪分辨力引入的不确定度分量  $u(h_2)$ （采用 B 类方法进行评定）。

分辨力为 1mm 的钢筋保护层厚度测量仪，按均匀分布，半宽取 0.5mm。

$$u(h_2) = 0.5 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.29 \text{ mm} \quad (\text{H-9})$$

H.5.1.3 钢筋探测仪示值误差引入的不确定度分量  $u(h_3)$ （采用 B 类方法进行评定）。

规范要求钢筋探测仪的测量精度不应大于 1mm。

$$u(h_3) = 1 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.58 \text{ mm} \quad (\text{H-10})$$

综上计算：与钢筋探测仪相关的不确定度分量  $u(h)$ ：

$$u(h) = \sqrt{u^2(h_1) + u^2(h_2) + u^2(h_3)} = \sqrt{0.42^2 + 0.29^2 + 0.58^2} = 0.77 \text{ mm} \quad (\text{H-11})$$

### H.5.2 与试块有关的不确定度分量 $u(h_a)$ 评定

钢筋直径的尺寸偏差引入的不确定度  $u(h_{a1})$ （采用 B 类方法进行评定）。

钢筋直径 16mm 的制造偏差  $\pm 0.4 \text{ mm}$ ，所以由钢筋直径的制造偏差引入的不确

定度如下：

按半宽为 0.4mm 的均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u(h_{a1}) = 0.4/\sqrt{3} = 0.23\text{mm} \quad (\text{H-12})$$

综上计算：与试块有关的不确定度分量  $u(h_a)$ ：

$$u(h_a) = u(h_{a1}) = 0.23\text{mm} \quad (\text{H-13})$$

#### H.6 合成标准不确定度 $u_c$ 的评定

$$u_c = \sqrt{u^2(h) + u^2(h_a)} = \sqrt{0.77^2 + 0.23^2} = 0.80\text{mm} \quad (\text{H-14})$$

#### H.7 不确定度评定一览表

序号	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度 $u(x_i)$ (mm)	$C_i$
1	$u(h)$	与钢筋探测仪有关的不确定度	0.77	1
1.1	$u(h_1)$	测量重复性引入的不确定度	0.42	/
1.2	$u(h_2)$	钢筋探测仪分辨力引入的不确定度	0.29	/
1.3	$u(h_3)$	钢筋探测仪示值误差引入的不确定度	0.58	/
2	$u(h_a)$	与试块有关的不确定度	0.23	-1
2.1	$u(h_{a1})$	钢筋直径尺寸偏差引入的不确定度	0.23	/
3	合成标准不确定度 $u_c = 0.80\text{mm}$			

#### H.8 测量结果的扩展不确定度 $U$

取置信因子  $k=2$

测量结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.80 = 1.6 \text{ mm} \quad (\text{H-15})$$

#### H.9 测量不确定度报告

钢筋保护层厚度检测结果为  $X = x \pm U = (40.2 \pm 1.6) \text{ mm}$   $k=2$  (H-16)