



中华人民共和国国家标准

GB/T 33303—2016

煤质分析中测量不确定度评定指南

Guide for evaluation of measurement uncertainty in coal analysis

2016-12-13 发布

2017-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 测量不确定度的评定方法	3
4.1 测量不确定度的评定程序	3
4.2 被测量的说明	3
4.3 测量不确定度的来源分析	3
4.4 测量模型的建立	4
4.5 标准不确定度的 A 类评定	4
4.6 标准不确定度的 B 类评定	6
4.7 合成标准不确定度的计算	8
4.8 扩展不确定度的确定	9
5 测量不确定度的报告与表示	10
附录 A (资料性附录) 测量不确定度评定举例	11

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国煤炭工业协会提出。

本标准由全国煤炭标准化技术委员会(SAC/TC 42)归口。

本标准起草单位:煤炭科学技术研究院有限公司检测分院。

本标准主要起草人:孙刚、杨华玉、王秋湘、李英华。

煤质分析中测量不确定度评定指南

1 范围

本标准规定了煤质分析中测量不确定度评定的术语和定义、测量不确定度的评定方法、测量不确定度的报告与表示。

本标准适用于煤质分析中测量不确定度的评定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 212 煤的工业分析方法

GB/T 214 煤中全硫的测定方法

GB/T 483 煤炭分析试验方法一般规定

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

3 术语和定义

GB/T 483 和 JJF 1059.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 GB/T 483 和 JJF 1059.1 中的某些术语和定义。

3.1

被测量 measurand

拟测量的量。

[JJF 1059.1—2012,定义 3.1]

3.2

测量结果 measurement result

与其他有用的相关信息一起赋予被测量的一组量值。

[JJF 1059.1—2012,定义 3.2]

3.3

实验标准偏差 experimental standard deviation

对同一被测量进行 n 次测量,表征测量结果分散性的量。用符号 s 表示。

注 1: n 次测量中某单个测得值 x_k 的实验标准偏差 $s(x_k)$ 可按贝塞尔公式计算:

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

式中:

x_i ——第 i 次的测得值;

$\bar{x}$ —— n 次测量所得一组测得值的算术平均值;

n ——测量次数。

注 2: n 次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 的实验标准偏差 $s(\bar{x})$ 为:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}}$$

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.10]

3.4

测量不确定度 measurement uncertainty

根据所用到的信息, 表征赋予被测量值分散性的非负参数。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.12]

3.5

标准不确定度 standard uncertainty

以标准偏差表示的测量不确定度。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.13]

3.6

相对标准不确定度 relative standard uncertainty

标准不确定度除以测得值的绝对值。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.17]

3.7

测量不确定度的 A 类评定 Type A evaluation of measurement uncertainty

在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.14]

3.8

测量不确定度的 B 类评定 Type B evaluation of measurement uncertainty

用不同于测量不确定度 A 类评定的方法对测量不确定度分量进行的评定。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.15]

3.9

合成标准不确定度 combined standard uncertainty

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。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.16]

3.10

扩展不确定度 expanded uncertainty

合成标准不确定度与一个大于 1 的数字因子的乘积。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.18]

3.11

包含区间 coverage interval

基于可获得的信息确定的包含被测量一组值的区间, 被测量值以一定概率落在该区间内。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.19]

3.12

包含概率 coverage probability

在规定的包含区间内包含被测量的一组值的概率。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.20]

3.13

包含因子 coverage factor

为获得扩展不确定度, 对合成标准不确定度所乘的大于 1 的数。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.21]

3.14

重复性限 repeatability limit

一个数值。在重复性条件下,即在同一试验室中、由同一操作者、用同一台仪器、对同一试样、于短期内所做的重复测定,所得结果间的差值(在 95% 概率下)的临界值。

[GB/T 483—2007, 定义 3.5.21]

3.15

再现性限 reproducibility limit

一个数值。在再现性条件下,即在不同试验室中,对从试样缩制最后阶段的同一试样中分取出来的、具有代表性的部分所做的重复测定,所得结果的平均值间的差值(在 95% 概率下)的临界值。

注: 改写 GB/T 483—2007, 定义 3.5.22。

3.16

测量模型 measurement model

测量中涉及的所有已知量间的数学关系。

[JJF 1059.1—2012, 定义 3.22]

4 测量不确定度的评定方法

4.1 测量不确定度的评定程序

煤质分析中测量不确定度评定的基本程序如下:

- a) 被测量的说明;
- b) 测量不确定度的来源分析;
- c) 测量模型的建立;
- d) 测量不确定度的 A 类评定;
- e) 测量不确定度的 B 类评定;
- f) 合成标准不确定度的计算;
- g) 扩展不确定度的确定。

4.2 被测量的说明

在说明被测量时一般应包括以下内容:

- a) 测量过程的描述;
- b) 被测量的影响参数;
- c) 被测量与其影响参数(输入量)的关系,如果可能,给出被测量 Y 与影响参数 X_i 的函数关系(见 4.4);
- d) 已知的系统性影响的校正值;
- e) 操作说明书等文件中给出的有关信息。

4.3 测量不确定度的来源分析

煤质分析中测量不确定度的主要来源如下:

- a) 被测量定义的不完整;
- b) 样品的代表性不够;
- c) 样品称量和溶液定容时的不确定度;
- d) 化学试剂、药品的纯度,以及基体效应引入的误差;
- e) 读取数据时的偏移;

- f) 测量仪器计量性能的局限性,如最大允许误差、灵敏度、分辨力、稳定性、计量检定或校准等引入的测量结果的变动;
- g) 测量标准或标准物质提供标准值的不确定度;
- h) 校准曲线拟合引入的不确定度;
- i) 引用的常数或其他参数值的不确定度;
- j) 测量方法和测量程序中的近似和假设;
- k) 在相同条件下,被测量重复测量值的变化;
- l) 被测量值修正引起的不确定度;
- m) 对测量环境条件影响认识不足或对环境条件的测量不完善。

上述测量不确定度可能互相影响,例如,第 k 项可能包含其他项的影响。

根据被测量的说明和测量模型以及测量影响因素的分析,识别并确定测量不确定度的来源(不仅限于上述的主要来源)。

4.4 测量模型的建立

4.4.1 测量中,当被测量(即输出量) Y 由 N 个影响参数 $X_1, X_2, \dots, X_N$ (即输入量)通过函数 f 来确定时,则式(1)称为测量模型。

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \dots\dots\dots (1)$$

4.4.2 输出量 Y 的每个输入量 $X_1, X_2, \dots, X_N$ 本身可看作被测量,也可取决于其他量,甚至包括修正值或修正因子,从而可能导出一个十分复杂的函数关系,甚至测量函数 f 不能用显式表示出来。

4.4.3 在分析测量不确定度时,测量模型中的每个输入量的不确定度均是输出量的不确定度的来源。

4.5 标准不确定度的 A 类评定

4.5.1 一组数据单个测得值和算术平均值的标准不确定度的评定

4.5.1.1 贝塞尔公式法

在重复性或再现性条件下对被测量 x 进行了 n 次独立测量,有 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值 $\bar{x}$ 、单个测得值的标准偏差 $s(x)$ 和算术平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$ 分别按式(2)、式(3)和式(4)计算:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

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

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

x_i ——第 i 次的测得值。

单个测得值的标准不确定度 $u(x)$ 为: $u(x) = s(x)$ 。

算术平均值的标准不确定度 $u(\bar{x})$ 为: $u(\bar{x}) = s(\bar{x})$ 。

4.5.1.2 极差法

一般在测量次数较少时,可采用极差法按式(5)估算标准偏差。

$$s(x) = \frac{R}{C} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

R ——一组数据的极差；

C ——极差系数(见表 1)。

表 1 极差系数 C

n	2	3	4	5	6	7	8	9
C	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97

单个测得值和算术平均值的标准不确定度的计算与 4.5.1.1 相同。

4.5.2 预评估重复性法

如测量系统稳定,测量重复性无明显变化,则可用该测量系统以与被测量样品相同的测量程序、操作者、操作条件和地点,预先对典型样品的相同被测量进行 n 次的重复测量(一般 n 不小于 10),按式(3)计算重复测量标准偏差,即为预评估的重复测量不确定度 $u(x)$ 。在之后的实际测定中,则可根据实际的重复测量次数 n ,按 $u(x) = \frac{u(x)}{\sqrt{n}}$ 计算算术平均值的标准不确定度。在煤质分析中,除特别要求者外,同一煤样的每一分析项目重复测量 2 次,此时 $n=2$ 。

注：用此方法评定的重复性不确定度比仅根据实际测定中很少次测量所得的不确定度有更高的可信度。

4.5.3 校准曲线拟合引入的标准不确定度的评定

当被测量 x 的估计值是由测量数据从最小二乘法拟合的校准曲线上查得时,校准曲线拟合引入的标准不确定度按下述步骤进行评定：

a) 校准曲线的建立

当用 m 个标准物质(其标准值为 x_{cal})进行校准曲线的拟合并对每个标准物质进行 n 次测量(其响应值为 Z_{cal})时,以 x_{cal} 为横坐标,以 Z_{cal} 为纵坐标,用最小二乘法拟合校准曲线如式(6)：

$$Z = Ax + B \dots\dots\dots (6)$$

式中：

Z ——标准物质测量的响应值；

x ——与 Z 线性相关的被测量(被测物的浓度或含量等)；

A ——校准曲线的斜率；

B ——校准曲线的截距。

b) 标准不确定度的评定

假定对第 j 个($j=1\cdots m$)标准物质(其标准值为 $x_{\text{cal},j}$)的第 i 次($i=1\cdots n$)测量响应值为 $Z_{\text{cal},ji}$,对样品进行 h 次测量,从校准曲线上查得被测量 x ,其平均值为 $\bar{x}$ 。

按式(7)计算校准曲线的估计标准偏差 $s_{\text{估计}}$ ：

$$s_{\text{估计}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [Z_{\text{cal},ji} - (A \cdot x_{\text{cal},j} + B)]^2}{m \times n - 2}} \dots\dots\dots (7)$$

按式(8)和式(9)分别计算各标准物质标准值的平均值 $\bar{x}_{\text{cal}}$ 和参数 L_{xx} ：

$$\bar{x}_{\text{cal}} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{\text{cal},j}}{m} \dots\dots\dots (8)$$

$$L_{xx} = n \sum_{j=1}^m (x_{\text{cal},j} - \bar{x}_{\text{cal}})^2 \dots\dots\dots (9)$$

按式(10)计算校准曲线拟合引入的 $\bar{x}$ 的标准不确定度 $u_{\text{cal}}(\bar{x})$ ：

$$u_{\text{cal}}(\bar{x}) = \frac{s_{\text{估计}}}{A} \cdot \sqrt{\frac{1}{h} + \frac{1}{m \times n} + \frac{(\bar{x} - \bar{x}_{\text{cal}})^2}{L_{xx}}} \dots\dots\dots (10)$$

4.6 标准不确定度的 B 类评定

4.6.1 概述

标准不确定度 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 ,然后按式(11)进行 B 类标准不确定度 u_B 的评定。

$$u_B = \frac{a}{k} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- a ——被测量可能值区间的半宽度；
 - k ——根据概率论获得的 k 称为置信因子,当 k 为扩展不确定度的倍乘因子时称为包含因子。
- 表 2 和表 3 分别给出了正态分布和非正态分布下概率与置信因子的关系。

表 2 正态分布下概率 P 与置信因子 k 值间的关系

P	50	68.27	90	95	95.45	99	99.73
k	0.67	1	1.645	1.960	2	2.576	3

表 3 常用非正态分布的置信因子 k

分布类型	$P(\%)$	k
三角	100	$\sqrt{6}$
梯形	100	$\sqrt{\frac{6}{1+\beta^2}}$
矩形(均匀)	100	$\sqrt{3}$
反正弦	100	$\sqrt{2}$
两点	100	1
注： β 为梯形的上底和下底之比。		

在缺乏信息的情况下,一般估计为矩形(均匀)分布是较合理的。但如果 x_i 是重复性条件下几个测量值的算术平均值,则可估计为正态分布。

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。

示例 1:生产厂提供的测量仪器的最大允许误差为 $\pm\Delta$,并经计量部门检定合格,则评定仪器的不确定度时,可能值区间的半宽度为: $a=\Delta$ 。

示例 2:校准证书提供的校准值,给出了其扩展不确定度为 U ,则区间的半宽度为: $a=U$ 。

示例 3:当测量仪器或实物量具给出准确度等级时,可以按检定规程规定的该等级的最大允许误差得到对应区间的半宽度。

4.6.2 常见 B 类标准不确定度的评定

4.6.2.1 称量标准不确定度

称量标准不确定度 u_m ,假设为均匀分布,通常以天平称量的最大允许误差 Δ 为区间半宽度,按式(12)计算:

$$u_m = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

4.6.2.2 体积标准不确定度

体积标准不确定度 u_L 主要考虑容器体积校准和温度差异引起的不确定度。

a) 容器体积校准不确定度 u_V

根据容器体积校准证书或容器准确度等级的信息,以体积最大误差 Δ 作为区间半宽度,按式(13)计算 u_V :

$$u_V = \frac{\Delta}{\sqrt{6}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

b) 温度差异引起的体积不确定度 u_T

按式(14)计算由温度差异引起的体积不确定度 u_T :

$$u_T = \frac{D \cdot V \cdot (\Delta t)}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

D ——体积膨胀系数,水的体积膨胀系数是 $2.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$;

Δt ——试验温度与校准温度之差;

V ——定容的体积。

c) 体积合成标准不确定度

按式(15)计算体积合成标准不确定度 u_L :

$$u_L = \sqrt{u_V^2 + u_T^2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

4.6.2.3 试剂纯度标准不确定度

试剂纯度的标准不确定度 u_P ,假设为均匀分布,通常以试剂纯度最大误差 Δ 为区间半宽度,按式(16)计算:

$$u_P = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

示例:铬的纯度为 0.999 9,其标准不确定度为: $u_P = 0.000 1/\sqrt{3} = 0.000 058$ 。

4.6.3 标准物质标定仪器引入的标准不确定度的评定

用一个标准物质标定仪器,重复测量 n 次,其引入的不确定度分量 u_B 按如下方法进行评估:

a) 标准值引入的不确定度分量 u_i

当标准物质证书上给出的标准值不确定度以标准偏差 s_i 表示时, u_i 等于 s_i ; 当标准物质证书上给出的标准值不确定度以扩展不确定度表示时, u_i 等于扩展不确定度除以包含因子 k 。

b) 重复测量平均值的不确定度 u_{rep}

按式(17)计算标准物质的 n 次重复测量平均值的不确定度 u_{rep} :

$$u_{\text{rep}} = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

x_i ——标准物质的单个测得值;

$\bar{x}$ ——标准物质 n 次测得值的平均值;

n ——标准物质的测量次数。

c) 合成标准不确定度 u_B

按式(18)计算标准物质标定仪器引入的合成标准不确定度 u_B :

$$u_B = \sqrt{u_i^2 + u_{\text{rep}}^2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

注: 当标准物质重复测量次数达到或超过 4 次时, 其平均值的重复测量不确定度显著小于标准值的不确定度, b) 项通常可忽略。

用多个标准物质标定仪器且由最小二乘法拟合校准曲线(或一元线性回归方程), 由该曲线查得的被测量的不确定度按 4.5.3 给出的方法计算。

4.6.4 用标准方法重复性限或再现性限进行的标准不确定度评定

当某不确定度影响因素的相应试验方法——国家标准或行业标准中, 明确指出该因素的测量重复性限 r 或再现性限 R 时, 则该因素的标准不确定度按式(19)或式(20)计算:

$$u(x_i) = \frac{r}{2.83} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$u(x_i) = \frac{R}{2.83} \quad \dots\dots\dots (20)$$

4.7 合成标准不确定度的计算

4.7.1 各不确定度分量彼此独立

4.7.1.1 合成标准不确定度 $u_c(y)$ 按式(21)进行计算:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u(x_i)^2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:

y ——被测量;

N ——影响被测量的独立参数的个数;

c_i ——各参数的灵敏系数, 即被测量 y 与有关的输入量 x_i 之间的函数对于输入量 x_i 的偏导数 $(\frac{\partial y}{\partial x_i})$;

x_i ——影响被测量的独立参数。

灵敏系数是一个有符号和单位的量值, 它表明了影响参数 x_i 的不确定度 $u(x_i)$ 影响被测量估计值的不确定度 $u_c(y)$ 的灵敏程度。有些情况下, 灵敏系数难以通过函数计算得到, 可以用实验确定, 即采用变化一个特定的 X_i , 测量出由此引起的 Y 的变化。

4.7.1.2 当测量模型为 $Y = A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots\dots\dots + A_N X_N$, 且各独立参数间不相关时, 被测量合成标准

不确定度可按式(22)计算:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 u^2(x_i)} \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

A_i ——常数。

4.7.1.3 当测量模型为 $Y = AX_1^{P_1} X_2^{P_2} \dots X_N^{P_N}$, 且各独立参数间不相关时, 被测量合成标准不确定度可按式(23)计算:

$$u_c(y) = |y| \times \sqrt{\sum_{i=1}^N [P_i \cdot u(x_i)/x_i]^2} \quad \dots\dots\dots (23)$$

4.7.1.4 当测量模型为加、减、乘、除混合型时, 则按照计算的先后原则, 将原有的数学模型分解成仅包含加减和仅包含乘除的单元, 按 4.7.1.2 和 4.7.1.3 计算每个单元的不确定度, 再将它们合成为被测量的标准不确定度。

示例: 测量模型为 $y = (x_1 + x_2) \times x_3$, 则先按 4.7.1.2 计算 x_1 和 x_2 的合成标准不确定度为:

$$u_c(x_1 + x_2) = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2}$$

再按 4.7.1.3 计算 y 的合成标准不确定度为:

$$u_c(y) = |y| \sqrt{\left[\frac{u_c(x_1 + x_2)}{x_1 + x_2} \right]^2 + \left[\frac{u(x_3)}{x_3} \right]^2}$$

4.7.2 各不确定度分量彼此不完全独立

假设测量模型为 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$, y 的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 按式(24)计算:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

x_i, x_j —— 两个彼此具有相关性的输入量;

$u(x_i), u(x_j)$ —— 输入量 x_i 与 x_j 的标准不确定度;

$r(x_i, x_j)$ —— 输入量 x_i 与 x_j 的相关系数。

当各输入量彼此不相关时, 相关系数为零, 式(24)转化为式(21); 当存在彼此相关的输入量时, 相关输入量的协方差应考虑。

相关输入量协方差的估计方法参见 JJF 1059.1—2012 中 4.4.4。

注 1: $r(x_i, x_j)u(x_i)u(x_j)$ 为输入量 x_i 与 x_j 的协方差, 用 $u(x_i, x_j)$ 表示。

注 2: 煤质分析中几乎不存在含彼此相关输入量的被测量。

4.8 扩展不确定度的确定

4.8.1 扩展不确定度是被测量估计值包含区间的半宽度。通常按式(25)计算。

$$U = k \cdot u_c \quad \dots\dots\dots (25)$$

包含因子 k 的取值与包含概率有关。一般取 $k=2$, 由 $U=2u_c$ 所确定的包含区间具有的包含概率约为 95%; 取 $k=3$ 时, 由 $U=3u_c$ 所确定的包含区间具有的包含概率约为 99%。

4.8.2 使用煤质分析试验方法的国家标准或行业标准时, 如标准方法中给出重复性限或再现性限, 则当报告的结果为同一化验室两个重复性测量值的平均值时, 该结果的扩展不确定度可按式(26)近似计算:

$$U = \frac{r}{2} \quad \dots\dots\dots (26)$$

报告结果为两个不同化验室再现性测定值的平均值时, 该结果的扩展不确定度可按式(27)近似

计算：

$$U = \frac{R}{2} \dots\dots\dots (27)$$

5 测量不确定度的报告与表示

5.1 测量不确定度报告的内容

测量不确定度报告一般应包括以下内容(附录 A 给出了测量不确定度评定举例)：

- a) 被测量的说明(测量方法、测量原理和测量过程的说明)；
- b) 测量模型；
- c) 测量不确定度的来源分析；
- d) 标准不确定度的 A 类评定；
- e) 标准不确定度的 B 类评定；
- f) 合成标准不确定度的计算；
- g) 扩展不确定度的确定；
- h) 测量结果的表示,包括被测量的估计值及其测量不确定度。

5.2 测量不确定度的表示

5.2.1 除非另有要求,测量结果的不确定度应采用扩展不确定度 U 报告,采用 $y \pm U$ 方式表示,或直接给出扩展不确定度值。扩展不确定度应说明包含因子 k 值的大小,一般取 $k = 2$ 。必要时,给出完整的测量不确定度报告。

示例:煤的挥发分产率为 $V_{ad} = 31.58\%$,合成标准不确定度 $u_c(V_{ad}) = 0.11\%$,则表示为: $V_{ad} = (31.58 \pm 0.22)\%$, $k = 2$;
或 $V_{ad} = 31.58\%$, $U = 0.22\%$, $k = 2$ 。

5.2.2 当用合成标准不确定度 $u_c(y)$ 报告测量结果的不确定度时应把测量结果和标准不确定度分开来表示。

示例:5.2.1 中的例子可表示为: $V_{ad} = 31.58\%$, $u_c(V_{ad}) = 0.11\%$ 。

5.2.3 在日常的例行检验中,虽无明确的测量不确定度报告,但测量按照标准方法规定的程序操作,测量过程处于受控状态,则测量结果的不确定度也可表示为“以重复性限表示的测量结果的不确定度符合有关标准的要求。”

5.2.4 通常最终报告的测量不确定度最多保留两位有效数字,测量结果应修约到其末位与不确定度的末位一致。

附 录 A
(资料性附录)
测量不确定度评定举例

A.1 煤的灰分测量不确定度的评定

A.1.1 试验数据

某煤样的灰分测量试验数据列在表 A.1 中。

表 A.1 煤的灰分测量试验数据

测量内容	第一次测量	第二次测量
灰皿质量/g	17.265 5	16.056 2
试样质量/g	1.000 0	1.004 4
灼烧后(灰皿+试样)质量/g	17.352 8	16.143 6
灰的质量/g	0.087 3	0.087 4
灰分产率/%	8.73	8.70
平均灰分(A_{ad})/%	8.72	

A.1.2 被测量的说明

称量灰皿质量,在灰皿中称取 1 g 左右煤样,称准至 0.000 2 g,放入马弗炉中,以一定的速度加热到 $815\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,并灼烧到质量恒定,以残留物的质量占煤样质量的质量分数作为煤样的灰分。

A.1.3 测量模型

煤的空气干燥基灰分按下式计算:

$$A_{ad} = \frac{m_1}{m} \times 100$$

式中:

A_{ad} ——空气干燥基灰分的质量分数,%;

m_1 ——灼烧后残留物的质量,单位为克(g);

m ——称取的试样质量,单位为克(g)。

A.1.4 测量不确定度的来源分析

灰分测量值不确定度来源主要包括:

- a) 测量重复性(不确定度的 A 类评定);
- b) 试样称量;
- c) 灼烧后残留物称量。

本例灰分测量值 8.72%,无需进行检查性灼烧,不考虑质量恒定的不确定度。

用函数形式表示为: $y(A_{ad}) = f(\text{重复性}, m, m_1)$

A.1.5 测量不确定度分量的评定

A.1.5.1 测量重复性

按贝塞尔公式计算：

$$s(\overline{A_{\text{ad}}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{\text{ad},i} - \overline{A_{\text{ad}}})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(8.73 - 8.72)^2 + (8.70 - 8.72)^2}{2(2-1)}} = 0.022\ 4(\%)$$

按极差法计算：

$$s(\overline{A_{\text{ad}}}) = \frac{R/C}{\sqrt{n}} = \frac{0.03/1.13}{\sqrt{2}} = 0.018\ 8(\%)$$

按预评估重复性法计算：

预先通过对一个类似煤样进行 10 次重复测量所得灰分(A_{ad})结果(%)如下:9.86、9.83、9.80、9.78、9.73、9.88、9.75、9.81、9.78、9.77,按式(3)计算得：

$$s(A_{\text{ad}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{\text{ad},i} - \overline{A_{\text{ad}}})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{(9.86 - 9.80)^2 + \dots + (9.77 - 9.80)^2}{10-1}} = 0.047\ 2(\%)$$

本次试验两次重复测量平均值引入的重复性标准不确定度为：

$$s(\overline{A_{\text{ad}}}) = \frac{s(A_{\text{ad}})}{\sqrt{n}} = \frac{0.047\ 2}{\sqrt{2}} = 0.033\ 4(\%)$$

A.1.5.2 测量不确定度的 B 类评定

a) 称量试样质量 m

如天平称量的最大允许误差为 0.000 5 g,按均匀分布转化的称量标准不确定度为：

$$u(m) = \frac{0.000\ 5}{\sqrt{3}} = 0.000\ 289(\text{g})$$

b) 称量灼烧后残留物质量 m_1

如天平称量的最大允许误差为 0.000 5 g,按均匀分布转化的称量标准不确定度为：

$$u(m_1) = \frac{0.000\ 5}{\sqrt{3}} = 0.000\ 289(\text{g})$$

A.1.6 合成标准不确定度的计算

灰分测量的各不确定度分量见表 A.2。

表 A.2 灰分测量的不确定度分量

不确定度分量	量值 x	标准不确定度 $u(x)$	相对标准不确定度 $u(x)/x$
试样称量	1.002 2 g	0.000 289 g	0.000 288
灼烧后残留物称量	0.087 35 g	0.000 289 g	0.003 31
按贝塞尔公式计算重复性	8.72%	0.022 4%	0.002 56
按极差法计算重复性	8.72%	0.018 8%	0.002 16
按预评估法计算重复性	8.72%	0.033 4%	0.003 78

相对合成标准不确定度计算如下：

如按贝塞尔公式计算重复性, $u_r(A_{ad}) = \sqrt{0.000\ 288^2 + 0.003\ 31^2 + 0.002\ 56^2} = 0.004\ 2$; 如按极差法计算重复性, $u_r(A_{ad}) = \sqrt{0.000\ 288^2 + 0.003\ 31^2 + 0.002\ 16^2} = 0.004\ 0$; 如按预评估重复性法计算重复性, $u_r(A_{ad}) = \sqrt{0.000\ 288^2 + 0.003\ 31^2 + 0.003\ 78^2} = 0.005\ 0$ 。

合成标准不确定度计算如下:

如按贝塞尔公式计算重复性, $u_c(A_{ad}) = 8.72 \times 0.004\ 2 = 0.037(\%)$; 如按极差法计算重复性, $u_c(A_{ad}) = 8.72 \times 0.004\ 0 = 0.035(\%)$; 如按预评估重复性法计算重复性, $u_c(A_{ad}) = 8.72 \times 0.005\ 0 = 0.044(\%)$ 。

A.1.7 扩展不确定度的确定

取包含因子 $k=2$ 。如按贝塞尔公式计算重复性, 则灰分测量值 A_{ad} 的扩展不确定度为 $U(A_{ad}) = 0.037 \times 2 = 0.07(\%)$; 如按极差法计算重复性, 则灰分测量值 A_{ad} 的扩展不确定度为 $U(A_{ad}) = 0.035 \times 2 = 0.07(\%)$; 如按预评估重复性法计算重复性, 则灰分测量值 A_{ad} 的扩展不确定度为 $U(A_{ad}) = 0.044 \times 2 = 0.09(\%)$ 。

A.1.8 测量结果的表示

如按贝塞尔公式计算重复性, 该煤样的灰分测量结果为: $A_{ad} = (8.72 \pm 0.07)\%$, $k=2$; 如按极差法计算重复性, 该煤样的灰分测量结果为: $A_{ad} = (8.72 \pm 0.07)\%$, $k=2$; 如按预评估重复性法计算重复性, 该煤样的灰分测量结果为: $A_{ad} = (8.72 \pm 0.09)\%$, $k=2$ 。

A.1.9 干燥基灰分(A_d)不确定度的评定

假定该煤样的水分测定值为 $M_{ad}=7.86\%$, 为两次测量的平均值, 则其干燥基灰分为:

$$A_d = A_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} = 8.72 \times \frac{100}{100 - 7.86} = 9.46\%$$

根据 GB/T 212 的规定, 当 $M_{ad}=7.86\%$ 时, 水分测量重复性限为 $r=0.30\%$, 由 r 转化的扩展不确定度为:

$$U(M_{ad}) = \frac{r}{2} = \frac{0.30}{2} = 0.15(\%)$$

该煤样的干燥基灰分 A_d 的扩展不确定度(重复性按预评估重复性法计算)为:

$$U(A_d) = 9.46 \times \sqrt{\left[\frac{U(A_{ad})}{A_{ad}}\right]^2 + \left[-\frac{U(100 - M_{ad})}{100 - M_{ad}}\right]^2} = 9.46 \times \sqrt{\left(\frac{0.09}{8.72}\right)^2 + \left(\frac{0.15}{100 - 7.86}\right)^2} = 0.10(\%)$$

该煤样的干燥基灰分可表示为: $A_d = (9.46 \pm 0.10)\%$, $k=2$ 。

A.2 煤的高位发热量测量不确定度的评定

A.2.1 试验数据

用恒温式氧弹热量计测量某煤样的发热量, 有关试验数据如下:

a) 热容量标定

苯甲酸标准热值: $Q = 26\ 459\ \text{J/g}$; 点火热: $25\ \text{J}$ 。苯甲酸热容量标定试验数据列在表 A.3 中。

表 A.3 热量计的热容量标定试验数据

序号	苯甲酸质量/g	测量温升/K	冷却校正/K	测得热容量 E/(J/K)
1	0.964 3	2.420 1	0.022 3	10 463
2	1.027 9	2.579 5	0.026 0	10 458
3	0.802 0	2.018 2	0.017 2	10 453
4	0.985 7	2.478 2	0.020 9	10 462
5	0.982 4	2.468 6	0.021 9	10 458
平均值	0.952 5	2.392 9	0.021 7	10 459
相对标准差				0.038 %

b) 发热量测定

热量计的热容量: $E=10\,459\text{ J/K}$; 点火热: 25 J ; 全硫: $S_{t,ad}=3.33\%$; 高位发热量 $Q_{gr,ad}=18\,973\text{ J/g}$ 。煤样发热量测量试验数据列在表 A.4 中。

表 A.4 煤样的发热量测量试验数据

序号	试样质量/g	测量温升/K	冷却校正/K	测得发热量 $Q_{b,ad}$ /(J/g)
1	0.998 4	1.830 9	0.013 6	19 298
2	1.006 3	1.845 6	0.015 8	19 321
平均值	1.002 4	1.838 2	0.014 7	19 310

A.2.2 被测量的说明

煤的高位发热量测量包含以下内容:

a) 热量计的热容量标定

称量一定质量的已知热值的苯甲酸标准物质,置于浸没在一定量水中的氧弹内燃烧,测量燃烧前后的水温,根据水温的升高计算热量计的热容量。

b) 煤样的发热量测量

称取一定质量的试验煤样,置于浸没在一定量水中的氧弹内燃烧,测量燃烧前后的水温,根据水温的升高计算试样的弹筒发热量。从弹筒发热量中扣除硫酸校正热和硝酸形成热即得高位发热量。

A.2.3 测量模型

煤的高位发热量的测量模型包含以下内容:

a) 热容量 E

$$E = \frac{Qm_b + q_1 + q_n}{[(t_n - t_0) + C]}$$

式中:

Q —— 苯甲酸的标准热值,单位为焦耳每克(J/g);

m_b —— 称取的苯甲酸质量,单位为克(g);

q_1 —— 点火热,单位为焦耳(J);

q_n —— 硝酸形成热,单位为焦耳(J), $q_n=0.001\,5\times Q\times m_b$;

t_0 —— 点火时的内筒温度,单位为开尔文(K);

t_n —— 终点时的内筒温度,单位为开尔文(K);

C —— 冷却校正,单位为开尔文(K)。

b) 弹筒发热量 $Q_{b,ad}$

$$Q_{b,ad} = \frac{E[(t_n - t_0) + C] - q_1 - q_2}{m}$$

式中:

q_2 ——添加物如包纸等产生的总热量,单位为焦耳(J);

m ——试样质量,单位为克(g)。

c) 高位发热量 $Q_{gr,ad}$

$$Q_{gr,ad} = Q_{b,ad} - (94.1 S_{b,ad} + \alpha Q_{b,ad})$$

式中:

$Q_{gr,ad}$ ——空气干燥煤样的恒容高位发热量,单位为焦耳每克(J/g);

$Q_{b,ad}$ ——一般分析试样的弹筒发热量,单位为焦耳每克(J/g);

$S_{b,ad}$ ——由弹筒洗液测得的煤样的含硫量,以质量分数表示,%;当全硫含量 $S_{t,ad}$ 低于 4.00% 时,或发热量大于 14.60 MJ/kg 时,可用全硫 $S_{t,ad}$ 代替 $S_{b,ad}$;

94.1 ——空气干燥煤样中每 1.00% 硫的校正系数,单位为焦耳每克(J/g);

α ——硝酸形成热校正系数:当 $Q_b \leq 16.70$ MJ/kg, $\alpha = 0.0010$; 当 16.70 MJ/kg $< Q_b \leq 25.10$ MJ/kg, $\alpha = 0.0012$; 当 $Q_b > 25.10$ MJ/kg, $\alpha = 0.0016$ 。

A.2.4 测量不确定度的来源分析

A.2.4.1 热容量的影响参数

热容量的影响参数有:苯甲酸标准热值 Q 、苯甲酸质量 m_b 、测量温升 Δt 、冷却校正值 C 、热容量漂移 s 、硝酸形成热 q_n 、点火热 q_1 、测量重复性 rep ,可表述为如下关系:

$$y(E) = f(Q, m_b, \Delta t, C, s, q_n, q_1, rep)$$

A.2.4.2 弹筒发热量的影响参数

弹筒发热量的影响参数有:热容量 E 、试样称量 m 、测量温升 Δt 、冷却校正值 C 、点火热 q_1 、测量重复性 rep ,可表述为如下关系:

$$y(Q_{b,ad}) = f(E, m, \Delta t, C, q_1, rep)$$

热容量标定和发热量测定中采用同样的点火热,它对弹筒发热量测定结果的影响基本抵消,可不考虑。因此:

$$y(E) = f(Q, m_b, \Delta t, C, s, q_n, rep)$$

$$y(Q_{b,ad}) = f(E, m, \Delta t, C, rep)$$

A.2.4.3 高位发热量的影响参数

高位发热量的影响参数有:弹筒发热量 $Q_{b,ad}$ 、硝酸形成热 q_n 、全硫含量测量 $S_{t,ad}$,可表述为如下关系:

$$y(Q_{gr,ad}) = f(Q_{b,ad}, q_n, S_{t,ad})$$

A.2.5 测量不确定度分量的评定

A.2.5.1 热容量的测量不确定度 $u(E)$

热容量的测量不确定度 $u(E)$ 评定如下:

a) 热容量的测量不确定度分量分析

1) 测量重复性的不确定度 $u(E, rep)$

热容量 E 为 5 次标定结果的平均值,其标准不确定度为:

$$u(E, \text{rep}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (E - \bar{E})^2}{5 \times (5 - 1)}} = \sqrt{\frac{(10\,463 - 10\,459)^2 + \cdots + (10\,458 - 10\,459)^2}{5 \times (5 - 1)}} = 1.78(\text{J/K})$$

2) 苯甲酸质量的不确定度 $u(E, m_b)$

如天平称量的最大允许误差为 0.000 2 g,按均匀分布转化的标准不确定度 $u(E, m_b)$ 为:

$$u(E, m_b) = \frac{0.000\,2}{\sqrt{3}} = 0.000\,115\,5(\text{g})$$

3) 苯甲酸标准热值的不确定度 $u(E, Q)$

苯甲酸标准物质证书中给出的标准热值为 26 459 J/g,其扩展不确定度为 0.1%,注明的包含因子为 $k=2$,换算的相对标准不确定度为:

$$u(E, Q) = 0.001/2 = 0.000\,5$$

4) 热容量漂移引入的不确定度 $u(E, s)$

假定不同时间热容量标定值相差在 0.10% 以内,按正态分布转化的标准不确定度为:

$$u(E, s) = \frac{0.001}{1.96} \times 104\,59 = 5.34(\text{J/K})$$

5) 总温升的不确定度 $u(E, \Delta t + C)$

假定温升测量的允许误差为 0.002 K,温升测量引入的标准不确定度 $u(E, \Delta t)$ 为:

$$u(E, \Delta t) = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.001\,155(\text{K})$$

研究表明,冷却校正值 C 通常在 0.01 K~0.03 K 之间,其相对误差不超过 0.5%;按正态分布 95% 置信概率下取 $k=1.96$ 。冷却校正值引入的标准不确定度为:

$$u(E, C) = \frac{0.005}{1.96} \times 0.021\,7 = 0.000\,055(\text{K})$$

总温升引起的标准不确定度为:

$$u(E, \Delta t + C) = \sqrt{0.001\,155^2 + 0.000\,055^2} = 0.001\,156(\text{K})$$

6) 硝酸形成热的不确定度 $u(E, N)$

研究表明,硝酸形成热校正系数的相对标准不确定度为 0.000 1,对于热容量,硝酸形成热的标准不确定度为:

$$u(N) = 0.000\,1 \times 0.952\,5 \times 26\,459/2.414\,6 = 1.04(\text{J/K})$$

b) 热容量的合成标准不确定度的计算

热容量标定的各不确定度分量见表 A.5。

表 A.5 热容量的不确定度分量

不确定度分量	量值	标准不确定度 $u(x)$	相对标准不确定度 $u(x)/x$
重复性	10 459 J/K	1.78 J/K	0.000 170 1
苯甲酸称量	0.952 5 g	0.000 115 5 g	0.000 121 3
苯甲酸标准热值	26 459 J/g	13.230 J/g	0.000 5
热容量漂移	10 459 J/K	5.34 J/K	0.000 510 6
总温升	2.414 6 K	0.001 156 K	0.000 478 8
硝酸校正热	10 459 J/K	1.04 J/K	0.000 099 4

热容量的相对合成标准不确定度为:

$$u_r(E) = \sqrt{0.000\ 170\ 1^2 + 0.000\ 121\ 3^2 + \cdots + 0.000\ 478\ 8^2 + 0.000\ 099\ 4^2} = 0.000\ 890\ 8$$

A.2.5.2 弹筒发热量的测量不确定度 $u(Q_b)$

弹筒发热量的测量不确定度 $u(Q_b)$ 评定如下：

a) 弹筒发热量的测量不确定度分量分析

1) 测量重复性的不确定度 $u(b, \text{rep})$

预先通过对一类似煤样进行 10 次重复测量所得弹筒发热量结果(J/g) 如下：20 449、20 456、20 478、20 489、20 505、20 483、20 512、20 496、20 515、20 490。按式(3)计算得 $S_{\text{rep}} = 21.929\text{ J/g}$ 。

本次试验两次测量平均值的重复性标准不确定度为：

$$u(b, \text{rep}) = 21.929 / \sqrt{2} = 15.506(\text{J/g})$$

2) 试样称量的不确定度 $u(b, m)$

如天平称量的最大允许误差为 0.000 2 g，按均匀分布转化的标准不确定度为：

$$u(b, m) = \frac{0.000\ 2}{\sqrt{3}} = 0.000\ 115\ 5$$

3) 总温升引起的不确定度 $u(b, \Delta t + C)$

温升测量引起的标准不确定度 $u(b, \Delta t)$ 为：

$$u(b, \Delta t) = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.001\ 155(\text{K})$$

冷却校正值为 $C = 0.014\ 7$ ，其引入的标准不确定度为：

$$u(b, C) = 0.014\ 7 \times \frac{0.005}{1.96} = 0.000\ 037\ 5(\text{K})$$

总温升引起的标准不确定度为：

$$u(b, \Delta t + C) = \sqrt{0.001\ 155^2 + 0.000\ 037\ 5^2} = 0.001\ 156(\text{K})$$

b) 弹筒发热量的合成标准不确定度的计算

弹筒发热量测量的各不确定度分量见表 A.6。

表 A.6 弹筒发热量测量的不确定度分量

不确定度分量	量值	标准不确定度 $u(x)$	相对标准不确定度 $u(x)/x$
重复性	19 310 J/g	15.506 J/g	0.000 803 0
试样称量	1.002 4 g	0.000 115 5 g	0.000 115 4
总温升	1.852 9 K	0.001 156 K	0.000 623 8
热容量标定值			0.000 890 8

弹筒发热量的合成标准不确定度为：

$$u_c(Q_b) = 19\ 310 \times \sqrt{0.000\ 803\ 0^2 + 0.000\ 115\ 4^2 + \cdots + 0.000\ 890\ 8^2} = 26.20(\text{J/g})$$

A.2.5.3 高位发热量的不确定度分量分析

a) 硝酸形成热的不确定度 $u(\text{gr}, \text{N})$

硝酸形成热的标准不确定度为：

$$u(\text{gr}, \text{N}) = 0.000\ 1 \times 193\ 10 = 1.93(\text{J/g})$$

b) 全硫含量引入的硫酸校正热的不确定度 $u(\text{gr}, S_{\text{t, ad}})$

按 GB/T 214 的规定，当 $S_{\text{t, ad}} = 3.33\%$ 时，全硫测量重复性限为 $r = 0.10\%$ ，故全硫两次重复测量平

均值的标准不确定度为：

$$u(S_{t,ad}) = \frac{r}{2 \times 2} = 0.025(\%)$$

硫酸校正热的标准不确定度为：

$$u(gr, S_{t,ad}) = 0.025 \times 94.1 = 2.35(\text{J/g})$$

A.2.6 高位发热量的合成标准不确定度的计算

高位发热量的合成标准不确定度 $u_c(Q_{gr,ad})$ 为：

$$u_c(Q_{gr,ad}) = \sqrt{26.20^2 + 1.93^2 + 2.35^2} = 26.38(\text{J/g})$$

A.2.7 高位发热量的扩展不确定度的确定

取 95% 包含概率下的包含因子 $k=2$, $U(Q_{gr,ad}) = 26.38 \times 2 = 53(\text{J/g})$

A.2.8 高位发热量测量结果的表示

该煤样的高位发热量($Q_{gr,ad}$)测量结果为： $(18.97 \pm 0.05)\text{MJ/kg}$, $k=2$ 。

A.3 校准曲线拟合引入的标准不确定度的评定

A.3.1 试验数据

用哈氏可磨性指数测定仪测量某煤样的哈氏可磨性指数(HGI),有关试验数据如下：

a) 哈氏可磨性指数仪的标定

哈氏可磨性指数测定仪的标定试验数据列在表 A.7 中。

表 A.7 哈氏可磨性指数测定仪的标定试验数据

序号	HGI 标准物质标准值	0.071 mm 筛下物质量($W_{-0.071}$)/g			
		1	2	3	4
1	39	4.068	4.078	3.837	4.095
2	61	6.694	6.618	6.783	6.835
3	85	10.664	10.575	10.831	10.741
4	96	11.981	11.766	11.898	11.831

b) 煤样哈氏可磨性指数的测量

煤样的哈氏可磨性指数测量试验数据列在表 A.8 中。

表 A.8 煤样的哈氏可磨性指数测量试验数据

序号	0.071 mm 筛下物质量($W_{-0.071}$)/g	查得(计算)的 HGI 值
1	8.543	71.7
2	8.755	73.2
平均	8.649	72.4 (报告值 72)

A.3.2 校准曲线的建立

用 4 个煤的哈氏可磨性指数标准物质进行校准曲线的拟合,每个标准物质进行 4 次重复测定,以

0.071 mm筛下物质量($W_{-0.071}$)为纵坐标,以 HGI 标准物质标准值为横坐标,采用最小二乘法拟合的校准曲线为: $W_{-0.071}=0.142\times\text{HGI}-1.635$,相关系数 $R=0.997\ 2$ 。

A.3.3 校准曲线拟合引入的标准不确定度的评定

按式(10)、式(11)和式(12)分别计算 $s_{\text{估计}}$ 、HGI 标准物质平均值 $\overline{\text{HGI}}_{\text{cal}}$ 和 L_{xx} 。

$$s_{\text{估计}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 [W_{-0.071,ji} - (0.142 \times \text{HGI}_{\text{cal},j} - 1.635)]^2}{4 \times 4 - 2}} = 0.251$$

$$\overline{\text{HGI}}_{\text{cal}} = \frac{\sum_{j=1}^4 \text{HGI}_{\text{cal},j}}{4} = \frac{39 + 61 + 85 + 96}{4} = 70.25$$

$$L_{xx} = 4 \times \sum_{j=1}^4 (\text{HGI}_{\text{cal},j} - \overline{\text{HGI}}_{\text{cal}})^2 = 4 \times [(39 - 70.25)^2 + \cdots + (96 - 70.25)^2] = 777\ 1$$

校准曲线拟合引入的煤样 HGI 平均值(报告值)的不确定度 $u_{\text{cal}}(\overline{\text{HGI}})$ 为:

$$u_{\text{cal}}(\overline{\text{HGI}}) = \frac{0.251}{0.142} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{4 \times 4} + \frac{(72 - 70.25)^2}{777\ 1}} = 1.33$$
