

冲击试验测量不确定度评定

段伟, 周继锋, 冯翠翠

(内蒙古包钢钢管有限公司, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 不确定度是一个表征测量结果可信度的参数, 反映了由于测量过程中误差的存在, 导致测量结果不能确定的程度。在科学研究和工程应用中, 冲击性能是选择材料的重要指标, 对冲击试验不确定度的正确评定, 可以更全面、准确地理解和表达冲击试验结果的可靠性和可信程度。文章介绍了冲击试验不确定度在实际试验中的应用, 并对影响冲击试验测量结果的各因素带来的不确定度进行详细评定, 为各机构正确认识和评定冲击试验的不确定度提供理论依据和参考。

关键词: 不确定度; 冲击; 评定

中图分类号: TH871.4

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)06-0092-04

Evaluation of Uncertainties of Measurement in Impact Testing

Duan Wei, Zhou Ji-feng, Feng Cui-cui

(Inner Mongolia Baotou Steel Pipe Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The uncertainty is a parameter for characterizing the reliability of measurement results, which reflects the degree of being uncertain of measurement results caused by the presence of errors during measurement process. In scientific researches and engineering applications, the impact property is an important indicator for selecting materials. The correct evaluation of uncertainty in impact testing can understand and express the reliability of impact testing results more comprehensively and accurately. In the paper, the applications of uncertainty in impact testing in actual tests are introduced as well as the uncertainties caused by the factors influencing measurement results of impact testing are evaluated in detail, which provide the theoretical basis and references for various institutions to correctly understand and evaluate the uncertainties of impact testing.

Key words: uncertainty; impact; evaluate

冲击性能指标是材料选择和使用的重要参考依据。然而, 在测量过程中, 由于参与测量的人员、设备、环境不同, 不可避免地存在各种不确定因素, 造成不同检测机构提供的测量结果的可信度不同。近年来, 人们对冲击试验测量结果的不确定度更加重

视^[1], 通过不确定度评定可以让使用者清晰、精准地了解测量结果的质量, 更加合理地判断材料的适用性和局限性, 也有利于检测实验室操作人员对测量结果进行分析、总结, 逐步提高自身的检测水平^[2]。

1 试验方法

本次评定由6名试验人员操作冲击试验机对被测试样进行冲击试验,依据 ASTM E23-24《金属材料缺口试样标准冲击试验方法》^[3]和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》^[4],应用综合评定法对冲击试验的不确定度进行评定。冲击试验机是经国家计量部门校准、满足 ASTM E23-24 附录(A1、A2)要求、型号为 JBNS-300、锤刃半径为8 mm的V型数显摆锤冲击试验机。被测试样分为6组,每组10个试样,在规格为 $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 10.03 \text{ mm}$ 、材质(钢级)为 34Mn6 (N80Q)的无缝套管上,沿管样纵向截取夏比冲击试样,试样尺寸为 $7.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$,试样的形状、缺口状态、尺寸公差及表面粗糙度都满足 ASTM E23-24 标准要求。试验温度为 $0 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度小于70%,符合 ASTM E23-24 标准要求。

2 测量结果

试验人员在每次冲击试验后对冲击试验结果进行记录,冲击试验结果的吸收功记录值为冲击试验机显示器的显示值。

$$y = x \quad (1)$$

式中: y 为冲击试验结果的吸收功记录值,J; x 为冲击试验机显示器显示值,J。

6名试验人员每人进行1组被测试样的冲击试验,每组为10个试样,即每人进行10次冲击试验,冲击试验结果如表1所示。

表1 试验结果统计

次数	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组
1	96	93	94	94	98	94
2	88	83	93	96	83	80
3	95	80	84	97	82	96
4	87	94	95	102	94	91
5	82	78	101	106	96	109
6	96	95	99	85	98	91
7	98	93	76	96	102	90
8	99	101	86	97	95	88
9	102	99	97	80	98	88
10	96	89	95	92	87	90
样本平均值 $\bar{A}_{k,j}$	93.9	90.5	92.0	94.5	93.3	91.7
样本标准差 S_j	6.208	7.835	7.703	7.546	6.881	7.409
总平均值 \bar{A}_k	93					
合并样本标准差 S_p	7.285					

3 测量不确定度来源分析

在试验方法、冲击试验机、冲击检测试样和人员操作方法均满足 ASTM E23-24 标准要求的前提下,影响冲击试验结果不确定度的因素主要是:因试验结果自带的重复性而产生的不确定度分量 $u(x_1)$,此因素中包含了试样内在原因,如材质的不均匀性和成分偏析、不同人员操作方法和操作能力、试样加工质量及试验当时所处环境的差异等;冲击试验机的误差所产生的不确定度分量 $u(x_2)$;冲击试验机所使用的校准试样自带偏差所产生的不确定度分量 $u(x_3)$;根据 ASTM E23-24 和 ASTM E29-22^[5]标准对试验结果数值经修约后所产生的不确定度分量 $u(x_4)$ ^[6]。

4 不确定度分量的评定

4.1 试验结果重复性所引入的不确定度分量 $u(x_1)$

在冲击试验过程中,由于冲击检测试样的内在因素,如成分不均和偏析、试样外在的加工质量、检测人员的操作能力、所用试验机的重复性不同等原因,致使最终的检测结果不可避免存在差异,因此,应将上述对试验结果的不确定度产生影响的各因素进行不确定度的评定。这可通过多名检测人员在同一台试验机上进行冲击试样测试,最终统计检测人员试验结果作为检测数据的观测列,计算标准差进行不确定度的评定(即采用A类评定方法),而且为了提高其可靠性,建议采用高可靠度的合并样本标准差 S_p 来进行评定。

第 j 组冲击吸收功记录值的平均值(样本平均值)为:

$$\bar{A}_{k,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{ki,j} \quad (2)$$

冲击吸收功的总平均值是:

$$\bar{A}_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{A}_{k,j} = 93 \text{ J} \quad (3)$$

式中: i 为试验次数,表1中所列 $i = 1, 2, \dots, 10$,即试验次数 $n = 10$; j 为组数,表1中所列 $j = 1, 2, \dots, 6$,即组数 $m = 6$; $A_{ki,j}$ 为第 j 组第 i 次试验的冲击吸收功记录值,J。

而第 j 组检测结果的标准差,即每组标准差 S_j 为:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{ki,j} - \bar{A}_{k,j})^2}{n-1}} \quad (4)$$

合并样本标准差 S_p 为:

$$\bar{S}_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_j^2} = 7.285 \text{ J} \quad (5)$$

对于本次评定试验的合并标准差是否可用, 特进行以下判定。由表 1 的数据经计算可得标准差 S_j 的平均值为:

$$\bar{S}_j = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_j = \frac{1}{6} \times 43.583 = 7.264 \text{ J} \quad (6)$$

所以标准差 S_j 的标准差 $\hat{\sigma}(S)$ 为:

$$\hat{\sigma}(S) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (S_j - \bar{S}_j)^2}{m-1}} = 0.613 \text{ J} \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}(S) = 0.613 \text{ J} < \frac{S_p}{\sqrt{2(n-1)}} = 1.717 \text{ J} \quad (8)$$

公式(8)表明, 试验过程稳定, 合并样本标准差 S_p 具有高可靠性, 可以应用。在日常的冲击试验过程中, 对于每一次正确的冲击试验, 每次检测一个试样, 就报一个试样的结果($k=1$), 所以所求分量为:

$$u(x_1) = \frac{S_p}{\sqrt{k}} = S_p = 7.285 \text{ J} \quad (9)$$

自由度为:

$$v = m(n-1) = 6 \times (10-1) = 54 \quad (10)$$

4.2 冲击试验机自身误差造成的不确定度分量 $u(x_2)$

试验室所用的冲击试验机经国家计量部门校准, 满足 ASTM E23-24 附录(A1、A2)的校准要求。校准证书所示, 间接校准标准试样的标值为 90.8 J (标值是标准试样评定机构在标准试样中随机抽选 25 个试样测得的能量值的平均值), 间接校准的 E_{fact} 为 3.5% (E_{fact} 是表示实际误差的绝对值, 即误差的半宽 a 等于 E_{fact})。试验结果在误差区间的分布概率是均匀的, 服从矩形分布($k=\sqrt{3}$), 所以有:

$$u(x_2) = \frac{a}{k} = \frac{E_{fact}}{\sqrt{3}} = 0.577 \times 3.5\% A_R = 1.834 \text{ J} \quad (11)$$

4.3 冲击试验机校准标样的标准差造成的不确定度分量 $u(x_3)$

冲击试验机是通过标准试样进行间接校准的,

因此, 标准试样的标准差是遵循量值传递规律的, 对试验结果的不确定度也产生了影响。校准所用的标准试样型号为 BCY (钢铁研究总院制造), 由校准机构通过一条不间断的比较链溯源至 SI 单位, 间接校准标样组的标值为 90.8 J, 当标准试样的标值 $A_R \geq 40 \text{ J}$ 时, 标准试样允许的差 $S \leq 3.0\% A_R$ 。根据 t 分布理论, 利用子样对正态母体平均值 u 进行区间估计的表达式^[6]为:

$$\bar{x} - t_p \frac{S}{\sqrt{n}} < u < \bar{x} + t_p \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

式中: \bar{x} 为子样的平均值; n 为子样数量, 25 个; S 为标准试样标准差; u 为母体平均值, 即标值; t_p 为 t 分布包含概率为 p 时的 $t_p(v)$ 值 (v 为自由度, $v = n - 1$)。

式(12)表明, 在包含区间 $(\bar{x} - t_p \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_p \frac{S}{\sqrt{n}})$, 包含 u 值的概率为 p , u 为母体的平均值, 是冲击试验结果的理想值, 根据不确定度的定义可知所求的不确定度分量 $u(x_3)$ 就是^[6]:

$$u(x_3) = t_p \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

式中: S 为标准试样标准差; n 为子样数量, $n = 25$; t_p 为 t 分布在 p 时的 $t_p(v)$ 值。

$A_R \geq 40 \text{ J}$ 时, $S \leq 3.0\% A_R$ 。对于本次评定, 最小的自由度是 $v = n - 1 = 24$ 。取 68% (查询 JJF 1059.1 标准的附录 B), 则:

$$t_p(v) = t_{68}(24) = 1.02 \quad (14)$$

$$u(x_3) = t_p \frac{S}{\sqrt{n}} = 1.02 \times \frac{0.03 \times 90.8}{\sqrt{25}} = 0.556 \text{ J} \quad (15)$$

4.4 冲击试验结果数值经修约后所产生的不确定度分量 $u(x_4)$

对于试验结果的数值修约, 如果 δ_x 为修约间隔, 则 $u(x) = 0.29\delta_x$ 就是所引入的不确定度分量。本文的冲击试样是根据 API 5CT(10) 标准规定的, 冲击吸收功应为整数, 修约方法按 ASTM E29-22^[5] 执行。所以修约间隔 δ_x 为 1 J。由此得出:

$$u(x_4) = 0.29 \times 1 = 0.29 \text{ J} \quad (16)$$

5 合成标准不确定度及扩展不确定度的评定

因冲击试验过程重复性产生的不确定度分量、冲击试验机自身误差产生的不确定度分量、校准标准试样的允许标准差产生的不确定度分量和冲击试

验结果数值经修约后产生的不确定度分量彼此间是相互独立、互不相关的,且根据公式(1),灵敏系数 $c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = 1$,因而可按照方和根的公式进行不确定的合成^[7],即:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(x_i)} = \sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) + u^2(x_3) + u^2(x_4)} \quad (17)$$

$$u_c(y) = \sqrt{7.285^2 + 1.834^2 + 0.556^2 + 0.29^2} = 7.538 \text{ J}$$

扩展不确定度 U 由 $u_c(y)$ 乘以包含因子 k 得到:
 $U = k \times u_c(y) = 2 \times 7.538 = 15 \text{ J} \quad (18)$
 $k = 2$,置信度约为 95%。其相对扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = \frac{U}{A_k} = \frac{15}{93} = 16\%, k = 2 \quad (19)$$

6 测量不确定度报告

根据上述的评定,本次冲击试验测量结果的相对扩展不确定度是:

$$\bar{A}_k = 93 \text{ J}, U_{\text{rel}} = 16\%, k = 2$$

这表明在预期符合正态分布的前提下,在 $(93 - 15)\text{J}$ 到 $(93 + 15)\text{J}$ 的区间内,该试验材料的夏比冲击吸收功测量结果置信水平为 95%。

7 结束语

本文以 ASTM E23 - 24《金属材料缺口试样标准冲击试验方法》作为检测方法,介绍了影响冲击试验测量结果不确定度的各影响因素和其相关的

不确定度评定的方法和过程,为不确定度评定过程提供了具有参考价值的思路和方法,有利于各机构和人员对不确定度的认识和使用。影响不确定度的因素除了本文中提到的因素外,还会受到检测人员操作水平和试样的加工质量等因素影响。因此,在日常检测工作中,除了加强对测量仪器的校准和维护,保证设备准确性外,还要重视人员的技能培训,不断提高人员的技能水平。

参 考 文 献

- [1] 王承忠. 测量不确定度原理及在理化检验中的应用[J]. 理化检验(物理分册), 2003, 39(1): 57 - 60.
- [2] 陈镇方, 张建军, 惠治国. 夏比摆锤冲击试验机测量结果不确定度评定[J]. 包钢科技, 2017, 43(1): 47 - 50.
- [3] ASTM E23 - 24, 金属材料缺口试样标准冲击试验方法[S].
- [4] JJF 1059. 1—2012, 测量不确定度评定与表示[S].
- [5] ASTM E29 - 22, 在测试数据中使用有效数字以确定是否符合规范 1 的标准实施规程[S].
- [6] 王承忠. 测量不确定度直接评定法和综合评定法的几个典型实例第二讲 综合评定法实例 1: 金属冲击试验测量不确定度的评定[J]. 理化检验(物理分册), 2006, 42(6): 319 - 323.
- [7] 张有为. 金属夏比冲击试验测量结果不确定度的评定[J]. 工程与试验, 2010, 50(3): 31 - 33.