



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 4957—2025

代替 GB/T 4957-2003

## 非磁性导电基体金属上非导电覆盖层 覆盖层厚度测量 振幅敏感涡流法

Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive base metals —  
Measurement of coating thickness —Amplitude-sensitive eddy-current method

(ISO 2360:2017,MOD)

2025-10-31 发布

2026-05-01 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会

## 目 次

前 言.....	III
1 范围.....	4
2 规范性引用文件.....	4
3 术语和定义.....	4
4 测量原理.....	5
5 影响测量不确定度的因素.....	6
5.1 覆盖层厚度的影响.....	6
5.2 基体金属的电学性能.....	6
5.3 几何结构：基体金属厚度.....	7
5.4 几何结构：边缘效应.....	7
5.5 几何结构：表面曲率.....	7
5.6 表面粗糙度.....	7
5.7 清洁度：发射效应.....	7
5.8 探头压力.....	7
5.9 探头倾斜度.....	8
5.10 温度的影响.....	8
5.11 中间覆盖层.....	8
5.12 外部电磁场.....	8
6 仪器的调整和校准.....	8
6.1 概述.....	8
6.2 厚度参考标准片.....	8
6.3 方法的调整.....	9
7 测量程序和评价.....	10
7.1 概述.....	10
7.2 测量次数和评价.....	10
8 结果的不确定度.....	10
8.1 总 论.....	10
8.2 仪器校准的不确定度.....	11
8.3 随机误差.....	11
8.4 条款5总结的因素引入的不确定度.....	12
8.5 综合不确定度，扩展不确定度和最终结果.....	12
9 精密度.....	12
9.1 通则.....	12
9.2 重复性( $r$ ).....	13
9.3 再现性( $R$ ).....	13
10 检测报告.....	14

附录A (资料性) 金属导体中涡流的产生 .....	15
附录 B (资料性) 根据 ISO/ ICE指南98-3来确定所用测量方法的测量不确定度的基础知识 ..	19
附录 C (资料性) 本文档中所描述的基于振幅敏感涡流法的覆盖层测厚仪的基本性能要求 .....	21
附录 D (资料性) 影响测量准确度因素的实验评估示例 .....	22
附录 E (资料性) 学员因素表 .....	25
附录 F (资料性) 不确定度评估示例 (第8章) .....	26
附录 G (资料性) 精密度细节 .....	28
参考文献 .....	31



# 非磁性导电基体金属上非导电覆盖层覆盖层厚度测量 振幅敏感涡流法

## 1 范围

本文件规定了利用振幅敏感涡流仪对非磁性导电基体金属上的非导电覆盖层厚度进行无损测量的方法。

在本文件中，术语“覆盖层”用于诸如油漆和清漆、电镀涂层、搪瓷涂层、塑料涂层、包覆层和粉末涂层的材料。该方法特别适用于测量大多数阳极氧化膜的厚度，但它不适用于测量所有的转化膜，有些转化膜因为太薄而不能用此方法测量(第6章)。

该方法还可适用于测量非导电基材上的非磁性金属覆盖层。然而，GB/T 31554中规定的相敏涡流法尤其适用于该应用，并且可以提供更高精度的厚度测量结果(附录A)。

该方法不适用于测量导电基体金属上的非磁性金属覆盖层。GB/T 31554中规定的相敏涡流法特别适用于此应用。然而，在电导率非常低的超薄涂层的特殊情况下，振幅敏感涡流法也可用于此应用(附录A)。

虽然该方法可以用于测量磁性基体金属上的覆盖层厚度，但该应用不推荐。在这种情况下，可以使用GB/T 4956中规定的磁性方法。只有在覆盖层厚度大约超过1mm时，振幅敏感涡流法也可用于此应用(附录A)

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 12334 金属和其他非有机覆盖层 关于厚度测量的定义和一般规则 (GB/T 12334-2001, ISO 2064:1996, IDT)

GB/T 5206 色漆和清漆术语和定义 (GB/T 5206-2015, ISO 4618:2014, IDT)

ISO/IEC 指南98-3, 测量不确定度——第3部分：测量不确定度表述指南 (GUM:1995)(ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of measurement-Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement(GUM:1995))

## 3 术语和定义

GB/T 12334、GB/T 5206 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**测量系统的调整** adjustment of a measuring system

第一步，在特定条件下，建立测量标准提供的具有测量不确定度的量值与具有相关测量不确定性的相应指示两者之间的联系，第二步，使用此信息建立关系以从指示中获取测量结果。

注1:校准可以用陈述、校准函数、校准图、校准曲线或校准表来表示。在某些情况下,它可能包括对具有相关测量不确定度的指示的加法或乘法校正。

注2:校准不应与测量系统的调整相混淆,通常被错误地称为“自校准”,也不应与校准的验证相混淆。

注3:通常,上述定义中的第一步被认为是校准。

[来源:ISO/IEC 指南99:2007,2.39(也称为“也称为”)]

### 3.2

#### 校准 calibration

第一步,在特定条件下,建立测量标准提供的具有测量不确定度的量值与具有相关测量不确定性的相应指示两者之间的联系,第二步,使用此信息建立关系以从指示中获取测量结果。

注1:校准可以用陈述、校准函数、校准图、校准曲线或校准表来表示。在某些情况下,它可能包括对具有相关测量不确定度的指示的加法或乘法校正。

注2:校准不应与测量系统的调整相混淆,通常被错误地称为“自校准”,也不应与校准的验证相混淆。

注3:通常,上述定义中的第一步被认为是校准。

[来源:ISO/IEC 指南99:2007,2.39(也称为“也IM”)]

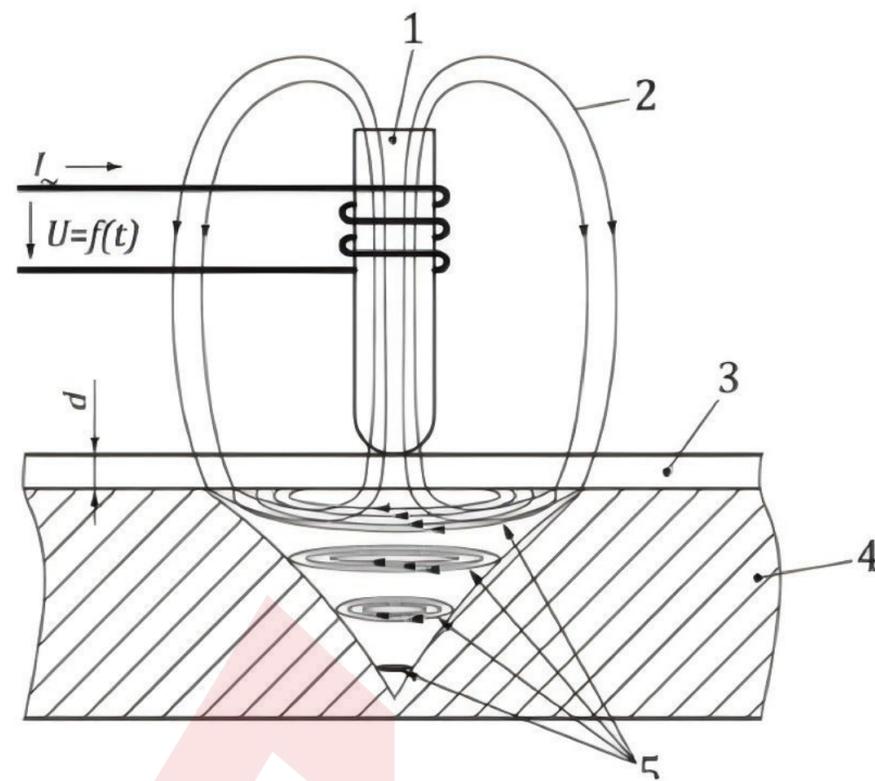
## 4 测量原理

涡流仪器的工作原理是,仪器探头系统产生的高频电磁场在放置探头的覆盖层下方的基体金属中产生涡流(见图1)。这些感应电流导致探测线圈周围的电磁场发生变化,从而导致探测线圈阻抗的幅度发生变化。感应涡流密度是发电线圈与基体金属表面之间距离的函数。因此,这种阻抗变化可以通过参考标准校准(附录A)用来衡量导体上覆盖层的厚度。

为了测量线圈阻抗幅值的变化,测试线圈通常是振荡器电路的一部分,其谐振频率由线圈的电感和电阻决定。线圈阻抗幅度的变化导致谐振频率的移动。因此,测得的共振频率是覆盖层厚度的量度。这些值要么通过数字方式进行预处理,要么直接显示在有用的刻度仪表上。探头和测量系统/显示器可以集成到单个仪器中。

注1:附件C描述了设备的基本性能要求。

注2:影响测量精度的因素在第5章中讨论。



标引序号说明:

- 1——探头的铁氧体磁芯
- 2——高频电磁场
- 3——非导电覆盖层
- 4——金属基体
- 5——感应涡流
- $I_e$ ——励磁电流
- $t$ ——覆盖层厚度
- $U=f(t)$ ——测量信号

图 1 振幅灵敏度涡流法

## 5 影响测量不确定度的因素

### 5.1 覆盖层厚度的影响

探头的灵敏度，即测量效果，随着探头测量范围内覆盖层厚度的增加而降低。在较低的测量范围内，这种测量不确定度(绝对值)是一定的，与覆盖层厚度无关。这种不确定性的绝对值取决于探头系统和样品材料的特性，例如基体金属电导率、基材粗糙度和样品表面的粗糙度。在较高的测量范围内，不确定性大约是覆盖层厚度的一个常数部分。

### 5.2 基体金属的电学性能

基体金属的电导率决定了给定探头系统和频率的感应涡流密度。因此，基体金属的电导率决定了该方法的测量效果。覆盖层厚度与测量值之间的关系很大程度上取决于基体金属的电导率。因此，校准程序和测量应在相同的材料上进行。具有不同电导率的不同材料以及电导率的局部波动或不同样品之间的变化会导致(或多或少)厚度读数的误差。

注：有些仪器和探头能够自动补偿基体金属电导率的影响，从而避免由此产生的厚度测量误差。

### 5.3 几何结构：基体金属厚度

如果基体金属厚度太小，线圈磁场在基体金属深处产生涡流会受到阻碍。这种影响只有基体金属厚度达到某个最小临界值以上才能被忽略。

因此，基体金属的厚度应始终高于该最小临界值。仪器的调整可以补偿由薄基材引起的误差。然而，基体金属厚度的任何变化都会导致不确定性和误差增加。

基体金属厚度的最小临界值取决于探头系统(频率、几何形状)和基体金属的导电性。除非制造商另有规定，其值应通过实验确定。

注：附录D.3 中描述了估算基体金属厚度最小临界值的简单实验。然而，在任何其他信息缺失的情况下，所需的基体金属厚度最小值  $t_{\min}$  可以根据公式(1)来估算。

$$t_{\min} = 3.80 \delta_0 \quad (1)$$

此处  $\delta_0$  是基体金属的标准穿透深度(见附录A.1)。

### 5.4 几何结构：边缘效应

涡流的感应会受到基体金属的几何限制(例如边缘、钻孔和其他)的阻碍。因此，太靠近边缘或角落进行的测量可能是无效的，除非仪器已针对此类测量进行了专门调整。避免边缘效应影响的必要距离取决于探头系统(场分布)。

注1:附录D.2中描述了一个估算边缘效应的简单实验。

注2:与 GB/T 31554 的相敏方法相比，振幅敏感的涡流仪器受边缘效应的影响要大得多。

### 5.5 几何结构：表面曲率

磁场的传播以及由此产生的涡流会受到基体金属表面曲率的影响。这种影响随着曲率半径的减小和覆盖层厚度的减小而变得更加明显。为了尽量减少这种影响，应在具有相同几何形状的基体金属上进行调整。表面曲率的影响在很大程度上取决于探头的几何形状，并且可以通过减小探头的敏感区域来降低影响。敏感区域非常小的探针通常称为微探针

注1:有些仪器和探头能够自动补偿基体金属表面曲率产生的影响，从而避免由此产生的厚度测量误差。

注2:在附录D.4 中描述了一个估算表面曲率影响的简单实验。

### 5.6 表面粗糙度

测量会受到基体金属和覆盖层的表面形貌影响。粗糙的表面会同时导致系统误差和随机误差。可以通过进行多次测量来减少随机误差，每次测量在不同的位置进行，然后计算该系列测量的平均值。

为了减少粗糙度的影响，应使用粗糙度与覆盖层样品基体金属相当的无覆盖层基体金属进行校准。如有必要，应在供需双方之间就所使用的平均覆盖层厚度的定义进行说明。

注：与 GB/T 31554 的相敏涡流法相比，振幅敏感涡流法测量受金属基体粗糙度的影响更大。

### 5.7 清洁度：发射效应

如果探头没有直接放在覆盖层上，探头和覆盖层之间的间隙(剥离)会影响测量，就好像它是一个额外的覆盖层一样。由于探针和覆盖层之间存在小颗粒，可能会无意中产生剥离。应经常检查探头尖端的清洁度。

### 5.8 探头压力

探头施加在试样上的压力会影响仪器读数，并且在调整和测量期间应始终保持压力不变。

当覆盖层较软时，探头压力的影响更为明显，因为探头尖端可以缩进覆盖层中。因此，探头压力应尽可能小。大多数市售仪器都配备了弹簧加载探针，可以确保在放置过程中保持恒定压力。如果探头没有弹簧加载，应使用合适的辅助装置。

注1:接触压力和探针压痕深度可以通过减小施加的负载力或使用具有较大尖端直径的探针来减小。

注2:可以通过在覆盖层表面放置已知厚度的保护箔层来减少探头尖端在软覆盖层中的压痕。此时，覆盖层厚度是测量厚度减去箔层厚度。当测量非导电基材上的非磁性金属覆盖层时，该方法不适用。

## 5.9 探头倾斜度

除非制造商另有说明，否则探头应垂直于覆盖层表面，因为将探头与表面倾斜会导致测量误差。通过探头设计或使用探头固定夹具，可以将意外倾斜的风险降至最低。

注：大多数市售仪器都配备了弹簧加载探针，可确保探头垂直放置在样品表面上。

## 5.10 温度的影响

由于温度变化会影响探头的特性，因此应当在与校准仪器时大致相同的温度条件下使用它。

注1:考虑到制造商的规格，温度变化的影响可以通过探头的温度补偿功能来减小。

注2:探头、仪器电子设备、环境和样品之间的温差会导致较大的厚度测量误差。一个典型的例子是热覆盖层的厚度测量。

大多数金属的电导率随温度的变化而变化。因为覆盖层厚度的测量会受基体金属电导率变化的影响，所以应避免大的温度变化(见5.2)。

## 5.11 中间覆盖层

如果中间覆盖层的电气特性与覆盖层或基体金属的电气特性不同，则中间覆盖层的存在会影响覆盖层厚度的测量。如果确实存在差异，当中间覆盖层厚度小于 $t_{min}$ ，那么测量值还会受到中间覆盖层厚度的影响。当中间覆盖层厚度大于 $t_{min}$ ，如果中间覆盖层是非磁性的，那么可以作为基体金属处理(见5.3)。

## 5.12 外部电磁场

测量结果可能会受到强电磁干扰场的影响。如果出现无法用其他因素解释的意外结果或结果的强烈变化，则应考虑这种影响。在这种情况下，应当在没有干扰场的位置进行对照测量。

# 6 仪器的调整和校准

## 6.1 概述

每台仪器在使用前，都需要根据制造商的说明通过合适的厚度参考标准和基体金属进行校准或调整。用于校准或调整的基体金属的材料、几何形状和表面性能应当与待测试样相似，以避免由第5章所述因素引入的偏差。否则，在估算测量不确定度时应考虑这些因素的影响。

在校准或调整过程中，仪器、标样和基体金属应当具有与试样相同的温度，以尽量减少温度引入的误差。

为了避免仪器漂移的影响，建议使用参考标准或对照样品进行定期对照测量。如有需要，必须重新调整仪器。

注：大多数仪器在操作员执行称为“校准”的功能期间自动调整自身，而校准结果通常不明显。

## 6.2 厚度参考标准片

用于校准和调整的厚度参考标准片是镀膜基体金属或箔层，它们放置在未镀膜的基体金属上。

箔片和覆盖层应不导电且不可磁化。参考标准的厚度值及其相关的不确定性应已知并明确记录。应标记这些有效的表面积值。厚度值应可追溯至经认证的参考标准。

不确定度应与其置信水平一起记录，例如：U(95%)，即“真实”值在报告记录的厚度值周围的不确定区间内的概率最小为95%。

使用前，应目视检查箔片和覆盖层是否有损坏或机械磨损，因为这会带来不当的调整，从而导致所有测量值出现系统偏差。

在大多数情况下，箔材料是塑料的。与磁性方法(参见 GB/T 4956)相比，导电材料，例如铜合金，就不能作为箔材料，因为在这种箔材料中会感应出涡流，它们会影响测量并导致厚度测量误差。

注：测量非导电基材上的非磁性金属覆盖层时，情况是“相反的”。

与选定的覆盖层基体金属相比，受益于将箔材料直接放置在每种基体金属上的可能性，可以使用箔材料作为参考标准。在调整中已经考虑了几何影响和其他因素的影响。

然而，将探头放在箔片上，可能会发生弹性或塑性变形，这会影响测量结果。此外，必须避免探头的尖端、箔和基体金属之间的任何间隙。尤其是对于凹面样品，或者箔片起皱或弯曲，通常探针的弹簧加载导向套的低压可能会产生间隙。

参考箔可能的弹性甚至塑性变形取决于探头的作用力和探头尖端的直径(见5.9)。因此，此类参考箔的校准应在所施加的力和尖端直径的可比值下进行，以避免在探头校准期间出现压痕差异。这样，在箔厚度值中已经考虑了相应的压痕误差，即该值可以小于未受影响的几何厚度。箔材料校准时使用的作用力和尖端直径的值应从参考箔材料制造商处获知，以便可以估算可能产生的厚度误差。

### 6.3 方法的调整

覆盖层测厚仪的调整是通过将探头放置在不覆盖层的基体金属和/或一块或多块已知覆盖层厚度的基体金属上来进行的。根据仪器类型、制造商的说明和所使用仪器的功能范围，可以对以下项目进行调整：

- a) 一块无覆盖层的基体金属；
- b) 一块无覆盖层的基体金属和一块已知覆盖层厚度的覆盖层基体金属；
- c) 一块无覆盖层的基体金属和几块具有不同确定覆盖层厚度的覆盖层基体金属；
- d) 几块具有不同确定覆盖层厚度的覆盖层基体金属。

根据6.2, 术语“覆盖层基体金属”包括放置在不覆盖层基体金属上的箔片。

所述的调整方法可能导致测量结果的精度不同，因此，应该使用最适合给定应用并保证所需精度的方法。不同调整方法所能达到的测量不确定度取决于量规的评估算法以及要测量的标准和基体金属的材料、几何形状和表面状况。如果通过一种方法无法达到所需的精度，则不同的调整方法可能会带来更好的结果。一般来说，可以通过增加调整点的数量来降低测量不确定度，并且调整点与待测覆盖层的预期厚度区间越接近，结果越好。

注1: 通过将探头放置在不覆盖层的基体金属上，使探头适应给定的基体金属的过程通常称为“调零”或“零点校准”。但是，即使此程序也是本文档定义的“调整”或调整过程的一部分。

注2: 根据调整仪器时所使用无覆盖层和有覆盖层基体金属的数量，相应的调整方法通常称为“单点调整”、“两点调整”或“多点调整”。

因仪器调整而产生的测量不确定度不能推广到所有后续测量。在每种情况下，都需要详细考虑所有具体和附加的影响因素，见第5条和附录 D。

注3: 某些类型的仪表允许将仪器重置为制造商的原始调整。此调整仅对制造商已知的无覆盖层或有覆盖层标准片有效。在使用一段时间后，如果利用这些标准片或相同类型的标准片来检查仪器，仪表和探头的任何劣化，例如，通过观察测量结果的偏差，可以识别出因接触极磨损而导致的探头磨损。

## 7 测量程序和评价

### 7.1 概述

每台仪器都应按照制造商的说明进行操作，特别是考虑到第5章中讨论的影响测量精度的因素。在使用仪器之前和影响测量精度的变化之后(见第5章)，应对仪器的调整进行检查。为确保仪器测量正确，每次都应在检验地点用有效标准进行校准：

- a) 仪器投入运行时，
- b) 测试样品的材料和几何形状发生变化，或
- c) 检查的其他条件已经改变，并且其影响未知(例如温度)。

由于并非所有测量条件的变化及其对测量精度的影响都可以立即识别(例如漂移、探头磨损)，因此在使用仪器时应定期校准。

### 7.2 测量次数和评价

覆盖层厚度应确定为几个单一值的算术平均值，这些值是在覆盖层表面的定义区域内测量的。除平均值外，还应报告标准偏差(见附录 B)。可以通过增加测量次数来减少测量不确定性的随机误差。如果没有另行规定或同意，建议至少测量五个单一值(取决于应用)。

注1:根据标准偏差，可以计算出变异系数  $V$ 。 $V$  对应于相对标准偏差(例如百分比)，可以直接比较不同厚度的标准偏差。

注2:测量的总离散由仪器本身的离散和试样引起的离散组成。操作者和探头在厚度测量范围内的标准偏差是通过在同一位置重复测量来确定的，如有必要，可借助用于放置探头的辅助设备来确定。

当在粗糙的覆盖层表面或已知大厚度梯度的试样上进行测量时(例如，由于它们的尺寸和/或形状)，单次测量之间偏差的原因应通过一系列测量来确定。

## 8 结果的不确定度

### 8.1 总论

应根据 ISO/IEC 指南98-3对测量厚度的不确定度进行全面评估。附录 B 中总结了不确定度表达背景的信息，附录 E 中描述了该计算的典型示例。

厚度测量结果的不确定度是一系列不同来源的不确定度的组合。应考虑的重要来源包括：

- a) 仪器校准的不确定度；
- b) 影响测量的随机影响；
- c) 由第5条总结的因素引起的不确定性；
- d) 进一步的影响、漂移、数字化效应和其他影响。

所有不确定度分量都应按照 ISO/IEC 指南98-3中的描述进行估计和总结为组合标准不确定度，参见附录 B。

以下简化方法给出了评估不确定度的可能程序(见8.2 至8.5)。

所列来源的单个不确定度分量取决于各自的测量、被测样品的特性、仪器、环境条件等，并且对于不同的应用可能会显现出很大的差异。因此，应详细评估每次测量的单个不确定度分量。不确定度的质量取决于所有不确定度分量的评估质量。缺少分量会导致错误的评估，从而导致错误的厚度结果。

特别是，第5章中列出的因素可能会导致较大的不确定性值，如果可能，应通过调整将其最小化。

注：除了需要在结果中表达不确定度外，对可能的不确定度分量的分析提供了详细信息，以改进测量。

## 8.2 仪器校准的不确定度

如果没有给出其他信息，可以通过在已知厚度  $t_r$  和不确定度  $U_r(k=2)$  的给定参考标准上实现  $n$  次重复测量，在有限的厚度范围内评估仪器的当前不确定度。测量结果是测得的厚度值  $t_m$  与标准偏差  $s(t_m)$  的算术平均值。校准的质量由测量所得差异  $|t_m - t_r|$  以及校准测量的组合不确定度的比率  $E$  来决定，这种不确定度 ( $E$  的分母， $k=2$ ) 被认为是由  $n$  次重复测量的随机误差 (与 8.3 相比) 和给定的参考标准不确定度  $U_r$  引起的。在  $E \leq 1$  的情况下，校准有效，不能通过本参考标准进一步改进，即无法从不确定度中区分差异。因此，校准的标准不确定度  $u_{cal}(k=1)$ ，相对于 1 个西格玛级别 ( $k=1$ )，由测量验证的组合不确定度给出。

但是，在  $E > 1$  的情况下，检测到不确定度内校准的显著偏差，应进行仪器调整以提高校准精度。见公式 (2) 和 (3)：

$$E = \frac{|t_r - t_m|}{2 \times u_{cal}} \quad (2)$$

$$u_{cal} = \sqrt{\left[ t(68.27\%, n-1) \times \frac{s(t_m)}{\sqrt{n}} \right]^2 + [0.5 \times u_r]^2} \quad (3)$$

注 1: 如果给出参考标准的公差  $T$  而不是  $U_r$ ，即  $(t_r \pm T)$ ，例如，在有证标准物质的证书中，各自的标准不确定度 (相对于 68.3% 置信水平) 可以计算为  $u_r = \frac{T}{\sqrt{3}}$ ，扩展不确定度 (相对于 95.4% 置信水平) 可以计算为  $U_r(k=2) = 1.653 \times \frac{T}{\sqrt{3}}$ 。对于正态分布与通常因素 2 的偏差是因为公差遵循矩形分布。

校准不确定度  $u_{cal}$  仅在  $t$  附近的较小厚度范围内有效。在厚度范围较大的情况下，应在厚度范围的两侧估算不确定度  $u_{cal}$ 。两个值之间的线性插值给出了作为厚度函数的相关的不确定度。

很多时候，校准的准确性受到参考标准的给定不确定度的限制，因为校准的不确定度不能小于使用的参考标准的不确定度。为了改进校准，需要具有较小不确定度的参考标准。

通常，制造商建议在测量开始时对无覆盖层的基体金属进行归一化或归零处理。这种归一化所产生的不确定度被认为已经包含在  $u_{cal}$  中。

注 2:  $t[68.27\%, n-1]$ : 学员因素 (自由度  $f=n-1$  和  $P=68.27\%$  的置信水平)。附件 E 中总结了各个值。

## 8.3 随机误差

一般而言，建议重复测量以提高所测厚度值 (见 7.2) 的算术平均值  $t$  的准确性，即减少厚度结果的不确定度。在  $n$  次重复测量的情况下，算术平均值  $t$  的标准不确定度  $u_{sto}(k=1)$  可以使用公式 (4) 来估算 (A 类)：

$$u_{sto} = t(68.27\%, n-1) \times \frac{s(t)}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

标准不确定度  $u_{sto}$  是不可预知而产生的所有错误或随机时间和空间变化的影响量的一种度量。

注 1: 标准不确定度  $u_{st}$  可以通过增加重复测量的次数来降低。例如样品表面粗糙时，这可能很重要。

注 2: 并非所有对不确定性  $u_{sto}$  的贡献都是随机性质的 (A 类)，这取决于实验的设计。例如，具有厚度梯度的较大

样品的厚度测量由于系统的厚度变化，导致较高的不确定度 $u_{sio}$ 。在减小测量区域的情况下， $u_{sio}$ 可以减小，算术平均值 $t$ 可以更好地描述局部厚度。

应注意解决以下风险：可能造成A类标准不确定度的B类标准不确定度（见8.4），没有被计算两次。

#### 8.4 条款5总结的因素引入的不确定度

在可能的情况下，应通过调整将第5条中总结的因素的影响降至最低。很多时候，这些影响只能被估算，由此产生的不确定度应被视为测量组合不确定度的一个组成部分。附录D中描述了估算其中一些因素的不确定性的简单实验。通常，这些因素的影响以及由此产生的不确定性是厚度的函数。因此，为了估算给定厚度或至少在较小厚度范围内的不确定性，应使用具有相关厚度的样品进行实验。

例如，考虑基体金属的导电性能的变化（电导率变化）。如附录D.5所述，应估算相关厚度的预期变化。相对于所选参考基体金属的厚度变化应为： $\Delta t_{bm} = \text{abs}(t_{\min} - t)$  或  $\Delta t_{bm} = \text{abs}(t_{\max} - t)$ 。这给出了由基材性能  $U_{bm}(k=1)$  变化引起的标准不确定度，如公式(5)所示：

$$u_{bm} = \frac{\Delta t_{bm}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

应对第5章中列出的所有相关因素进行标准不确定度的相同估算。例如，在表面曲率的预期变化导致相对于附录D.4的 $\Delta t_s$ 的情况下，标准不确定度可以估算为 $u_{cs}(k=1)$ ，如公式(6)所示：

$$u_{cs} = \frac{\Delta t_{cs}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

如果通过调整将某个因素的影响降到最低，则应考虑剩余的不确定度因素。

如果使用与预期样品所示具有相同材料和曲率特性的基底金属上的箔进行校准，则可以通过将柔性箔作为参考标准来使影响精度的一些因素最小化，例如基底金属性能(5.3)或表面曲率(5.5)。在这种情况下，只应考虑样品性能的预期变化。

#### 8.5 综合不确定度，扩展不确定度和最终结果

综合不确定度汇总了所有标准不确定度分量(8.2、8.3、8.4和任何潜在的其他分量)。在所描述的简化方法中，当估算给定厚度或非常小的厚度范围的不确定性时，灵敏度系数可以被认为等于1(见附录B)。这使得组合不确定度 $u_c$ ，如公式(7)所示：

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{sto}^2 + u_{bm}^2 + u_{cs}^2 + \dots} \quad (7)$$

作为最终结果，计算出扩展不确定度  $U(k=2)$  (2-sigma 水平, 95.45%)，如公式(8)所示：

$$U(k=2) = 2u_c \quad (8)$$

完整的测量结果与厚度值 $t$ 的计算如公式(9)所示：

$$t = t \pm U(k=2) \quad (9)$$

## 9 精密度

### 9.1 通则

关于精密度的更多信息，请参见附录 G。

## 9.2 重复性 (r)

应根据重复性 $r$ 是小于或等于在重复性条件下获得的两个独立测试结果之间的差值的绝对值，其概率为95%(根据 ISO 5725-1:1994,3.16)。表1给出了根据本文件并以95%的概率计算的重复性限值 $r$ 。

表1-重复性限值(r)

涂层厚度 大约 ( $\mu\text{m}$ )	第一个测量点的重复性 极限(三次测量) $1x1$ $\mu\text{m}$	所有五个测量点的 重复性极限 $1x$ $\mu\text{m}$
12	1.0	1.0
25	1.7	2.3
125	2.7	12.5

## 9.3 再现性 (R)

再现性限值 $R$ 是小于或等于在再现性条件下获得的两个独立测试结果之间的差异的绝对值，其概率为95%(根据 ISO 5725-1:1994,3.20)。根据本文件并以95%的概率计算的再现性限值 $R$ 见表2。

表2 -再现性限值(R)

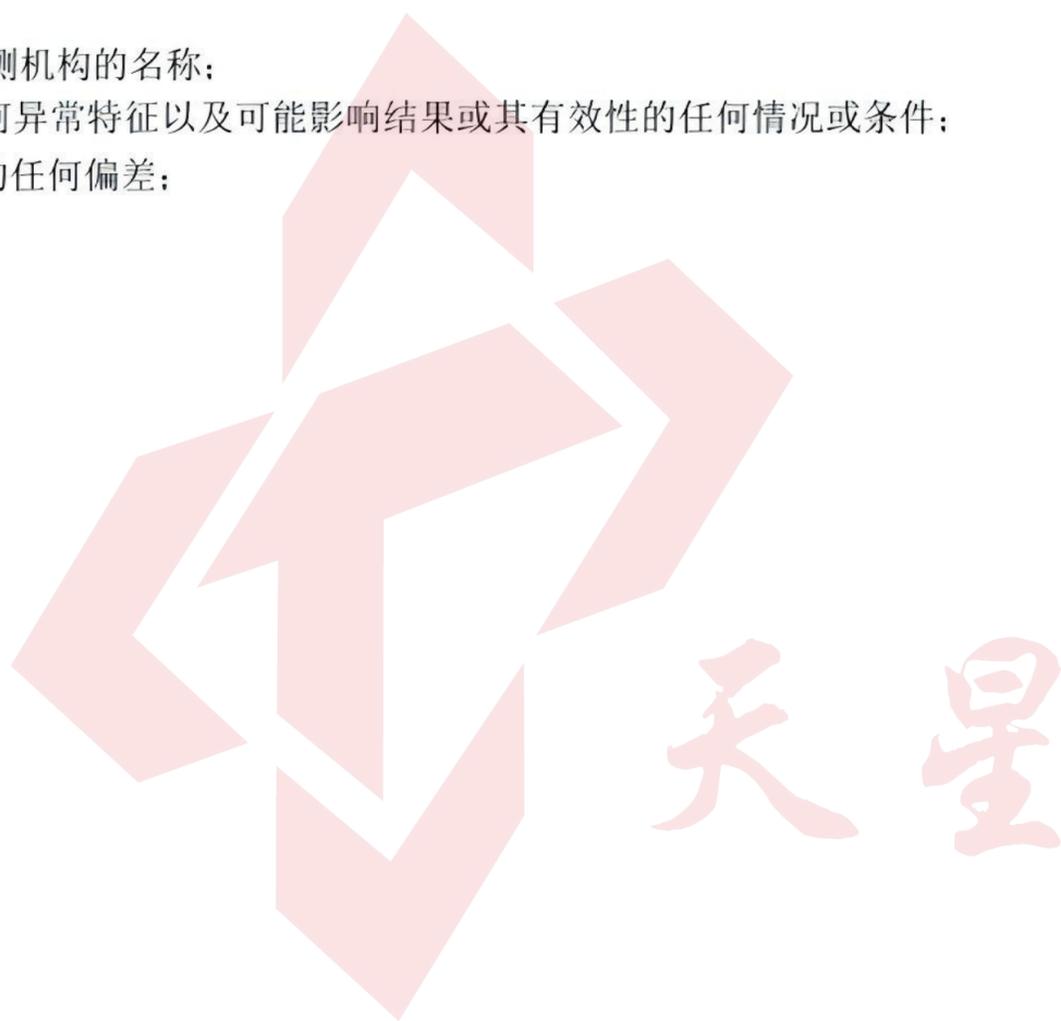
涂层厚度 大约 ( $\mu\text{m}$ )	第一个测量点的再现性 极限(三次测量) $Rx1$ $\mu\text{m}$	所有五个测量点的 再现性极限 $Rx$ $\mu\text{m}$
12	_a	_a
25	5.0	5.3
125	6.0	13.0

a仅针对一个样品无法计算 $Rx1$ 和 $Rx$ 的再现性。

## 10 检测报告

检测报告应包括以下信息：

- a) 识别试样所需的所有信息；
- b) 对本文件的引用，包括其出版年份，即 GB/T 4957—2025；
- c) 以平方毫米( $\text{mm}^2$ ) 为单位进行测量的测试区域的大小；  
注：经供方和客户协商，可以使用其他计量单位。
- d) 每个试样上测试区域的位置；
- e) 测量的试样数量；
- f) 用于测试的仪器、探头和标准的标识，包括对设备的任何验证证明的参考；
- g) 测试结果，报告为在进行测试的每个区域的测量厚度值，以微米为单位，包括单个测量值及其算术平均值；
- h) 操作者和检测机构的名称；
- i) 观察到的任何异常特征以及可能影响结果或其有效性的任何情况或条件；
- j) 与指定方法的任何偏差；
- k) 测试日期。



## 附录 A

(资料性)

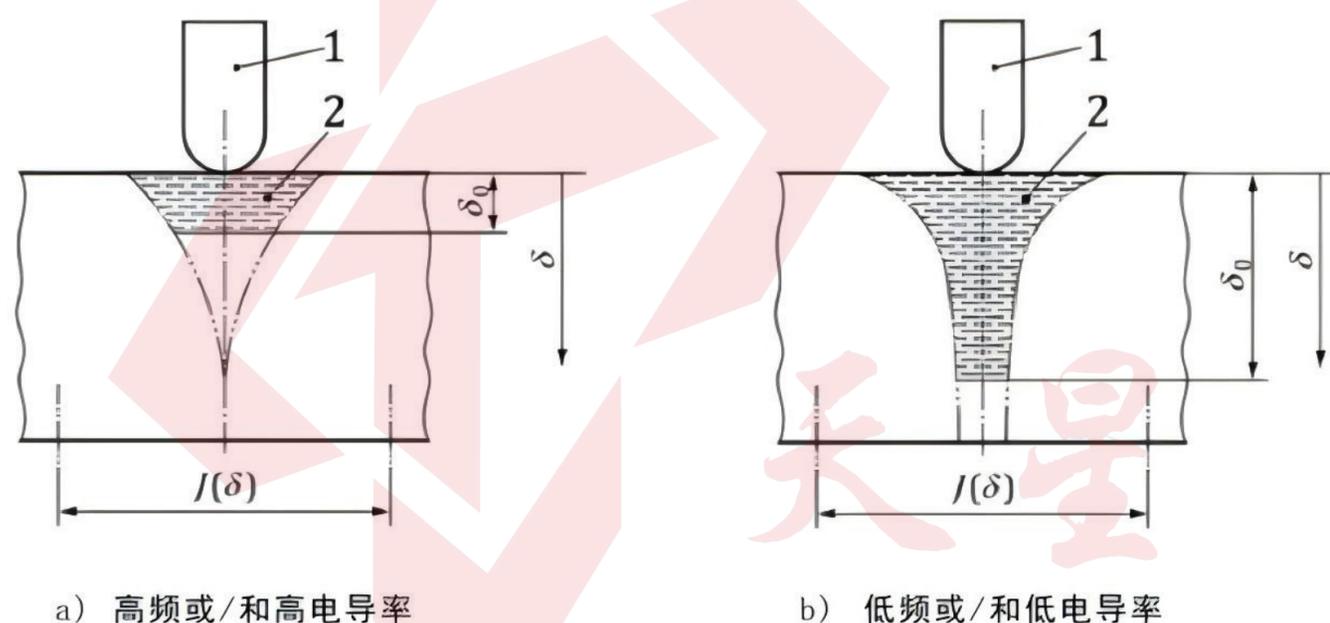
## 金属导体中涡流的产生

## A.1 概述

涡流仪器的工作原理是仪器的探头系统产生的高频电磁场在放置探头的电导体中产生涡流。这些感应涡流导致探测线圈系统周围的电磁场发生变化，从而导致探测线圈阻抗的幅度和/或相位发生变化，它可以用来测量导体上覆盖层的厚度(见 A.2 和 A.5) 或导体本身的厚度(见 A.3 和 A.4)。金属导体中产生的涡流如图1所示。

涡流密度 $J(\delta)$  随着与导体表面(深度)的距离 $\delta$ 的增加而变化。在深度 $\delta_0$  (标准穿透深度)处, 电磁场和电流密度下降至 $\frac{J(\delta_0)}{J(0)} = \frac{1}{e}$ 。理论上, 该标准穿透深度由样品电导率和探头线圈系统的磁

导率和频率决定: 见图 A.1。



标引序号说明:

1——探头;

2——涡流;

$\delta_0$ ——标准穿透深度;

$\Delta$ ——深度;

$J(\delta)$ ——密度。

图 A.1 显示频率和电导率对标准穿透深度影响的示意图

对于一些重要的粗略估计, 标准穿透深度是一个有用的值。可用公式 (A.1) 计算, 单位为毫米:

$$\delta_0 = \frac{503}{\sqrt{f \times \sigma \times \mu_r}} \times F_p \quad (\text{A.1})$$

式中:

$f$ ——为探头工作频率, 单位为赫兹 (Hz);

$\Sigma$ ——是导体的电导率, 单位为兆西门子/米 (MS/m);

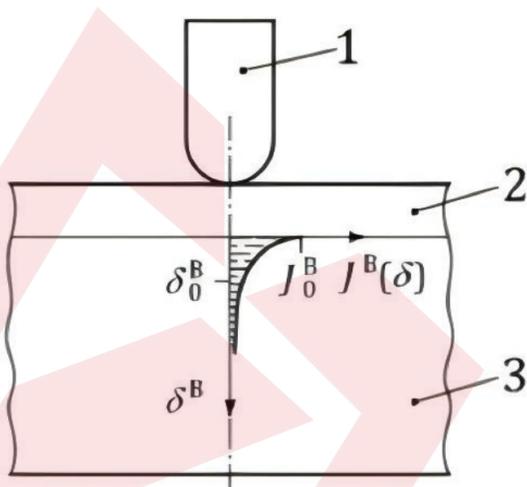
$\mu_r$ ——是导体的相对磁导率(对于非磁性材料  $\mu_r=1$ );

$F_p$ ——是由探头的几何形状确定的校正因子。

振幅敏感涡流法最适用于测量非磁性基体金属上的非导电覆盖层(见 A.2),也适用于测量非导电基体金属上的裸露非磁性金属覆盖层(见 A.3)。相敏涡流法(见 ISO 21968)最适合测量金属或非金属基体金属(见 A.2 和 A.3)上的非磁性金属覆盖层,特别是如果必须通过描绘测量金属覆盖层,或者如果需要非接触式测量,即需要“剥离”补偿。

### A.2 示例1:导电基体金属上的非导电覆盖层

在这种情况下,涡流密度仅由探头与基体金属之间的距离决定,即覆盖层厚度(见图 A.2)。较大的覆盖层厚度导致探头磁场与基体金属的相互作用降低,从而降低涡流密度。这种效应可以用作覆盖层厚度的量度。



标引序号说明:

- 1 —— 探头;
- 2 —— 非导电覆盖层;
- 3 —— 导电基体金属。

图 A.2 导电基体金属上非导电覆盖层的涡流密度示意图

为了确定涡流密度是覆盖层厚度的唯一量度,该密度不应受到基体金属厚度的影响或限制。为了达到这一点,基体金属的厚度应大于最小基体金属厚度。该最小厚度  $t_{min}$ ,以 mm 为单位,可按公式 (A.2) 所示估算(见 5.3):

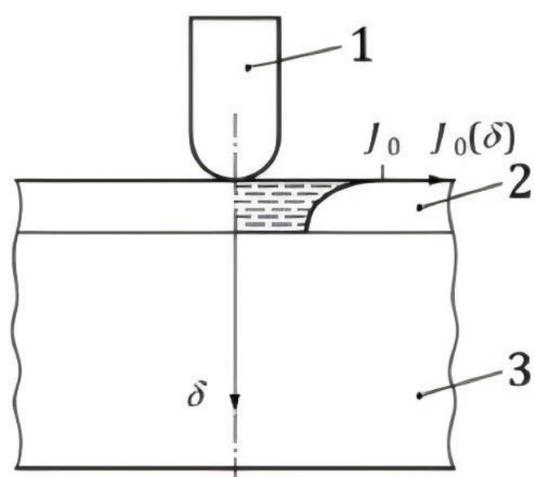
$$t_{min}=380 \quad (A.2)$$

注:  $t_{min}$  通常被称为“饱和厚度”。如果基体金属厚度低于这个最小厚度  $t_{min}$ ,覆盖层厚度的测量值会受到影响,测的厚度值太高。

然而,在电导率很小的非常薄覆盖层的特殊情况下,也可以应用振幅敏感涡流法,因为这种覆盖层被认为是不导电的。一个典型的例子是镀在铜上的薄铬镀层,镀层厚度低于  $10 \mu m$ 。在这种情况下,镀层中感应的涡流的影响可以忽略不计。然而,尽管铬镀层的电导率很小,较大的厚度会导致镀层中的涡流密度增加,从而导致厚度误差增加。应确定或估计可能的厚度误差,以决定该方法是否适用。

### A.3 示例2:非导电基材上的导电覆盖层

在这种情况下,涡流密度仅由导电覆盖层的厚度决定(见图 A.3)。较大的覆盖层厚度导致探头的磁场与导电覆盖层的相互作用增加,从而导致涡流密度增加。这种效应可以当作覆盖层厚度的量度。



标引序号说明:

- 1 —— 探头;
- 2 —— 导电覆盖层;
- 3 —— 非导电基体金属。

图 A.3 非导电材料上导电覆盖层的涡流密度示意图

最大可测量厚度的近似值,  $t_{\max}$ , 以毫米为单位, 可通过公式 (A.3) 计算:

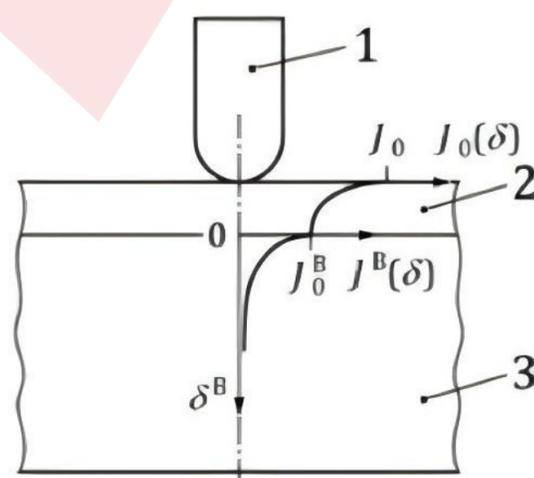
$$t_{\max} = 0.8\delta_0 \quad (\text{A.3})$$

例如, 厚度测量范围受标准穿透深度  $\delta_0$  的限制。如果导电覆盖层厚度进一步增加, 由此产生的涡流密度的增加开始变得更小, 即测量灵敏度将降低。

振幅敏感涡流法只能用于测量非导电材料顶部的导电覆盖层。在导电基体金属顶部的导电覆盖层的情况下, 振幅敏感涡流法无法区分覆盖层和基体金属, 即覆盖层和基体金属中产生的整个涡流密度将用于确定覆盖层厚度。这会导致错误的厚度值。

#### A.4 示例3: 导电和/或磁性基体金属上的导电覆盖层

在这种情况下, 如图 A.4 所示, 产生的涡流密度由覆盖层的厚度和导电性以及基体金属的导电性和渗透性决定。覆盖层厚度只能通过相敏涡流法测量。详细信息参见 ISO 21968。



标引序号说明:

- 1 —— 探头;
- 2 —— 导电覆盖层;
- 3 —— 导电基体金属。

图 A.4 导电和/或磁性基体金属上导电覆盖层的涡流密度示意图

#### A.5 示例4:磁性基体金属上的非导电覆盖层

在这种情况下,涡流密度仅由探头与基体金属之间的距离决定,即覆盖层厚度(见图 A.2)。但是,探头阻抗也受到基体金属磁性的影响,导致厚度误差。这种附加的测量效果与涡流的效果是相反的。此外,振幅敏感涡流法对基体金属磁导率的变化或波动非常敏感,不同的磁性基体金属,以及同一种基体金属(例如钢)上的不同位置,即使在校准中考虑到磁性基材,厚度结果预计也会显示出强烈的变化。因此,在这种情况下应使用 ISO 2178 中规定的磁性方法。

只有在覆盖层厚度大约1毫米以上的情况下,振幅敏感涡流方法也可以用于此应用。有如下两个原因:

a) 对于这种厚覆盖层,基体金属渗透性的相对影响大大降低;

b) 为了测量如此厚的覆盖层,涡流探头线圈显示出较大的直径,因此,测量中包含的覆盖层的有效面积增加了。通过这种方式,探针整合了整个活性区域中的渗透率变化,从而产生更稳定的结果。

应根据预期可接受的重复性和测量的正确性来确定在这些应用中使用该方法所需的最小覆盖层厚度。



## 附录 B

(资料性)

根据 ISO/ICE 指南98-3来确定所用测量方法的测量不确定度的基础知识

## B.1 概述

覆盖层厚度通常定义为在覆盖层表面的固定部位进行几次独立测量结果的平均值。基于这些测量，将平均值分配给被测量“覆盖层厚度”。分配了一个不确定性值，该值提供了有关分配值可靠性的信息。

分析是逐步进行的，首先绘制一个模型方程，该方程显示了指示的输出值  $t$  和所有相关影响量  $H_i$  之间的函数相关性，如公式 (B.1) 所示：

$$t = F(H_0, H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_n) \quad (\text{B.1})$$

每个影响量都属于一个敏感系数  $C_i$ ，它表示修正  $\Delta H_i$  对结果  $t$  的影响程度。当  $F$  函数作为解析表达式给出，灵敏度系数可以通过偏导计算：见公式 (B.2)：

$$C_i = \frac{\partial t}{\partial H_i} \quad (\text{B.2})$$

如果函数相关的种类未知，建议使用多项式函数进行近似。在许多实际情况下，此公式由线性相关性表示，即灵敏度系数变为常数。例如，这种情况出现在涂层厚度有限的部分。

为了恰当地总结各种误差影响的不确定度，所有单个不确定度分量可以参考68.27%的置信水平，即所谓的“标准不确定度”。有两种类型的不确定度：A型（见B.2）和B型（见B.3）。

## B.2 A类

A类标准不确定度是对不可预测的影响量或随机的时间和空间变化引起的所有随机误差的量度。标准不确定度对应平均值的置信点：见公式 (B.3) 和公式 (B.4)：

$$u_{\text{sto}} = t(68.27\%, n-1) \times \frac{s(t)}{\sqrt{n}} \quad (\text{B.3})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{x} - x_j)^2}{(n-1)}} \quad (\text{B.4})$$

式中：

$S$  —— 重复测量  $n$  的经验标准偏差；

$t(68.27\%, n-1)$  —— 学员因素（自由度  $f=n-1$  和  $p=68.27\%$  的置信水平）。

附录E总结了各个值。

## B.3 B类

许多影响因素或错误不属于A类描述，例如第5条的影响因素。这些被归类为B类。

为了实现这些误差影响与A类不确定性的平衡组合，分配了自组织概率因子。在许多实际情况中，这里所处理的影响因素是用均匀分布（矩形分布）来描述的。

如果一个影响量在一个区间  $\Delta H$  内波动，则产生的不确定度可按公式 (B.5) 计算：

$$u_B = \frac{|t_{\text{max}} - t_{\text{min}}|}{\sqrt{12}} \quad (\text{B.5})$$

这些波动通常是估算的或通过实验确定（见附录D）。

在许多应用中，已知的不确定度可用于不确定度测定。一个典型的例子是厚度参考标准的给定不确定度。要发布此信息，请考虑将这些不确定度声明转换为标准不确定度，例如，对于 $U(k=2)$ ，遵循公式 (B.6) 所示的标准不确定度：

$$u(68.27\%) = \frac{U(95.45\%)}{2} \quad (\text{B.6})$$

为了汇总所有研究的不确定性，通过将所有标准不确定度乘以其灵敏度系数并将它们平方相加，来完成计算所谓的“组合不确定性”。在一个简化的情况下，灵敏度系数是相等的，见公式 (B.7)：

$$u = \sqrt{\sum_i (c_i u_i)^2} \quad (\text{B.7})$$

乘以指示的覆盖因子 $k \geq 2$  会导致不确定性扩大，应在实际结果中注明：

$$U = k \cdot u \quad (\text{B.8})$$



## 附录 C

(资料性)

## 本档中所描述的基于振幅敏感涡流法的覆盖层测厚仪的基本性能要求

## C.1 技术规范

制造商的技术规范至少应提供仪器和探头的以下技术信息：

- a) 测量原理；
- b) 测量范围；
- c) 如果在制造商规定的条件下进行测量，则有关测量不确定度或允许的测量误差的基本信息；
- d) 关于测量结果如何受基体金属材料、曲率和厚度以及边缘效应(靠近边缘的测量)影响的信息；
- e) 电池工作时间；
- f) 亏电监测和亏电自动关闭功能；
- g) 允许工作温度；
- h) 允许储存温度；
- i) 可用的校准和调整方法；
- j) 探针与弹簧加载导向套的接触力；
- k) 温度补偿的可用性；
- l) 测量速率；
- m) 数据存储(设计、容量、数据通信)；
- n) 仪器(含电池)和探头的尺寸和重量。

## C.2 仪器和探头的检查/验证

## C.2.1 供货前、维修后和使用后定期维护

根据制造商的说明调整仪器和探头后，应使用平面和无覆盖层的基体金属和具有代表性数量的覆盖层校准试片或校准箔来检查和验证测量精度，其覆盖层或箔厚度应均匀分配在探头相应的测量范围内。仪器检查/验证的目的是确保厚度偏差在制造商的技术规范内。

## C.2.2 供货前、维修后和使用后定期维护

应每天验证仪器和探头的准确性。根据制造商的说明对仪器进行调整后，使用与被测物相同的基体金属制成的适当数量的覆盖层校准片或通过放在被测基体金属上的校准箔片进行验证。它们的厚度应涵盖预期的覆盖层厚度范围。如果需要测量弯曲的覆盖层样品，应在与待测物品具有相同的基体金属、几何形状和曲率的物品上进行验证。

仪器检查/验证的目的是确保厚度偏差在制造商的技术规范内。

## 附录 D

(资料性)

## 影响测量准确度因素的实验评估示例

## D.1 概述

影响测量精度的因素在第5章中进行了总结和描述。在实际测量中，重要的是要估算这些因素的影响或由此产生的不确定度。因此，本附件中描述了一些简单实验的例子，以说明如何估算这些因素的影响。这些实验也为估算各自的不确定度提供了基础。

D.2 到 D.5 中描述的因素可能会对在一个探头中使用组合测量原理的仪器产生不同的显著影响。因此，应针对每个测量原理分别估算这些因素。

## D.2 边缘效应

一个简单的边缘效应测试，用于评估接近边缘处的影响，包括使用干净、无覆盖层且均匀的基体金属样品，并遵循以下步骤1至步骤4中描述的程序。该过程如图 D.1 所示。

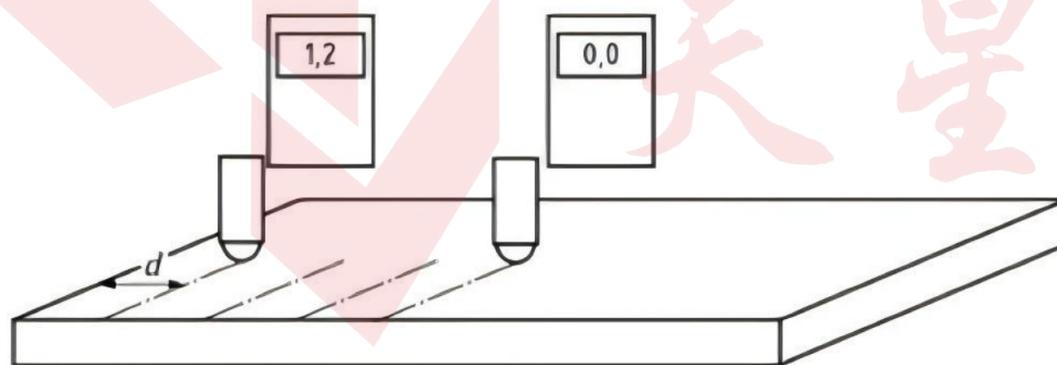
第1步 将探头放在样品上，远离边缘。

第2步 调整仪器读数为零。

第3步 逐渐将探头移向边缘，并记录仪器读数相对于预期不确定度或给定厚度公差发生变化的位置。

第4步 测量从探头到边缘的距离  $d$  (见图 D.1)。

如果探头到边缘距离比上面测量的距离更远，则仪器可以在不进行校正的情况下使用。如果探头靠近边缘使用，则需要特殊调整，或者需要考虑所使用距离的额外不确定度。如有必要，请参阅制造商的说明。



标引序号说明：

$d$  —— 探头到边缘的距离。

图 D.1 边缘效应测试示意图

## D.3 基体金属厚度

证明基体金属厚度  $t_0$  大于临界最小基体金属厚度  $t_{crit}$  的简单测试包括使用两个(或更多)清洁、无覆盖层甚至具有确定厚度的基体金属样品，并遵循步骤1至步骤4中描述的过程。该过程如图 D.2 所示。

第1步 将探头放在第一个样品上。应证明读数不受样品边缘的影响(见 D.2)。

第2步 调整仪器读数为零。

第3步 将第二个样品放在第一个样品下方，将探头放在该堆栈顶部并检查仪器读数。如果仪器读

数相对于预期不确定性仍然为零，则基体金属厚度 $t_0$ 大于临界最小基体金属厚度  $t_{ocrit}$ ，无需考虑额外的不确定性。如果仪器读数相对于预期的不确定性呈负变化，则 $t_0$ 小于 $t_{ocrit}$ ，即测量受到基体金属厚度过小的影响。

第 4 步 如果 $t_0$ 小于  $t_{ocrit}$ ，则在步骤3的堆栈下方放置第三个样品，将探头放在该堆栈的顶部并检查仪器读数。如果仪器读数仍与步骤3中的不确定性相同，则临界最小基体金属厚度位于  $t_0 < t_{ocrit} < 2 t_0$  范围内。如果仪器读数显示比步骤3更大的负值，则两倍  $t_0$ 仍小于 $t_{ocrit}$ ，继续堆叠更多样本以估计 $t_{ocrit}$ 。

如果基体金属厚度 $t_0$ 大于 $t_{ocrit}$ ，则仪器可以不经校正使用，如果 $t_0$ 小于 $t_{ocrit}$ ，则需要特殊校准校正，并且应考虑可能的基体金属变化导致相应厚度不确定度的增加。

实验确定的临界最小基体金属厚度 $t_{ocrit}$ 可用于估算产生的不确定性。

为了提高 $t_{ocrit}$ 估计的准确性，应使用厚度小于  $t_0$ 的样本。

如果仪器不显示负值，建议在探头和母材之间使用薄箔片(例如 $10\ \mu\text{m}$ )，观察厚度的减少情况。

注：为了模拟基体金属厚度的增加，堆叠多个样品的过程可以很好地估算  $t_{ocrit}$ 因为与各自的均质材料相比，样品之间的气隙对样品堆中涡流产生的影响几乎可以忽略不计(涡流垂直于探头轴)。因此，这种简化的程序可以更容易地进行并获得良好的结果，而不是生产具有可变厚度的基体金属。

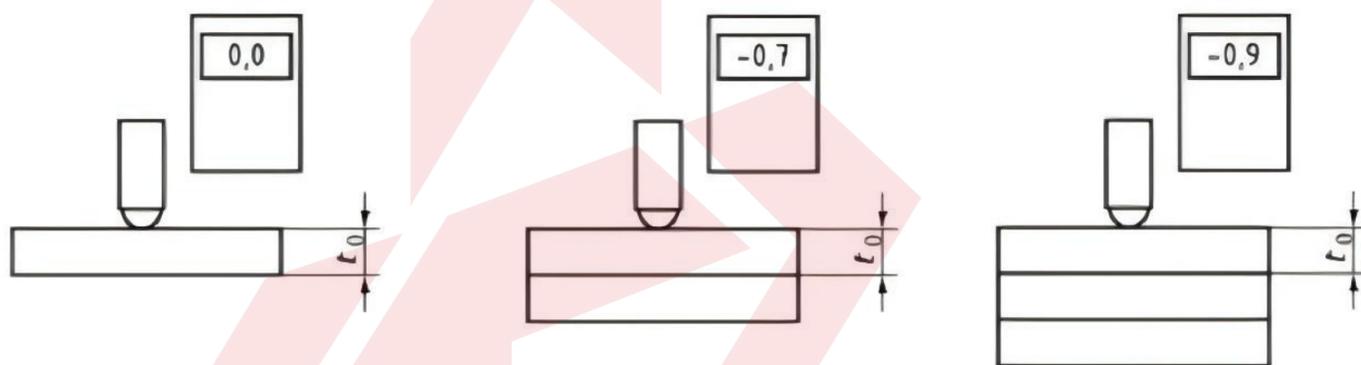


图 D.2 母材厚度试验示意图

#### D.4 表面曲率

评估样品表面曲率影响的简单测试：使用具有不同曲率直径(例如圆柱体)的干净的无覆盖层基体金属样品，并遵循以下步骤1至步骤4中描述的程序。所有使用的样品应提供与基体金属相同的材料特性。该过程在图 D.3 中以凸曲率为例进行了说明。

第 1 步 将探头放在均匀(无弯曲)的样品上。应证明读数不受样品边缘的影响(见 D.2)，并且样品的基体金属厚度大于临界最小基体金属厚度(见 D.3)。

第 2 步 调整仪器读数为零。

第 3 步 从最大可用直径开始将探头放在每个样品上，然后以减小的样品直径继续测试。记录相对于预期不确定性或给定厚度公差仪器读数发生变化时(正增加)的直径。

如果预期的样品显示出比所记录直径更大的直径，则该仪器可以不经校正使用。如果直径较小，则需要调整或特殊校准校正，或者可以考虑使用距离的附加不确定性。如有必要，请参阅制造商的说明。

在实际情况下，预期的样品的直径经常变化。在这种情况下，应估算预期的最小和最大直径，并应在接近平均直径的无覆盖层样品上调整仪器。因此，最小和最大直径的测量偏差可以从所描述的程序中估算出来，并用于估算不确定性。在测量过程中考虑这种不确定性。

为了提高曲率影响估计的准确性，增加不同直径的样本数量。

注：相同的程序可用于样品显示凹曲率的情况，但是，这种凹曲率会导致厚度读数为负。如果仪器不显示负值，建议在探头和基体金属之间使用薄箔片(例如 $10\ \mu\text{m}$ )，观察厚度的减少情况。

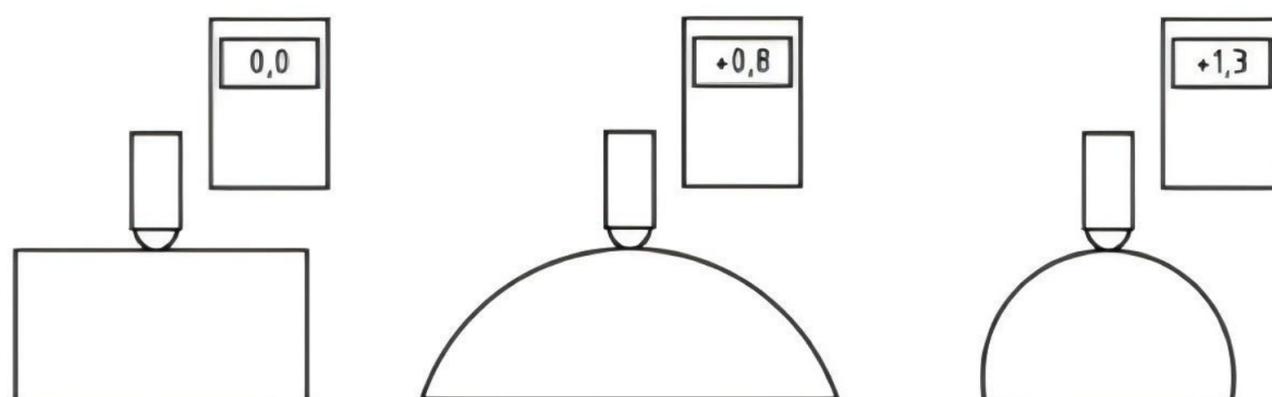


图 D.3 曲率效应测试示意图

### D.5 基体金属的电导率

在实际情况下，基体金属的电导率经常变化。下面第1步到第5步中描述的简化程序有助于减少这种影响并估算由此产生的不确定度。该程序需要几个无覆盖层、干净且均匀的样品，这些样品大致代表了基体金属的预期变化。该过程如图 D.4 所示。

第 1 步 将探头放在其中一个样品上。应证明读数不受样品边缘的影响(见 D.2)，样品的基体金属厚度大于临界最小基体金属厚度(见 D.3)，并且样品是偶数(无曲率，见 D.4)。

第 2 步 调整仪器读数为零。

第 3 步 将探头放在每个样品上并记录读数。建议对每个样品进行重复测量，并在接下来的步骤中使用平均值。

第 4 步 计算所有样品读数的平均值，并选择与该平均值偏差最小的样品。

第 5 步 使用这个选定的样品作为参考基体金属对所有测量进行调零。

如果最小读数(或最大读数)的样品与计算平均值的偏差小于预期的不确定度或给定的厚度公差，则该仪器可以不经校正使用。

如果有较大的差异，应将所选样品用作参考基体金属，并且和所描述程序的读数的估算偏差可用于估算不确定度。在测量期间应考虑这种不确定度。

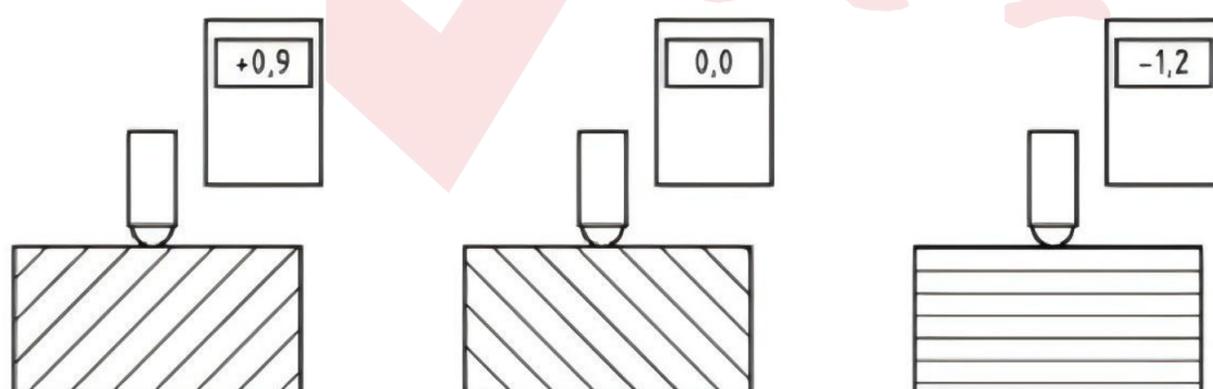


图 D.4 金属基体电导率测试示意图

## 附录 E

(资料性)

## 学员因素表

学员因素表见表E.1。

表 E.1 学员因素表

测量次数 n	百分比P	
	68.27%	95.45%
2	1.84	13.97
3	1.32	4.53
4	1.20	3.31
5	1.14	2.87
6	1.11	2.65
7	1.09	2.52
8	1.08	2.43
9	1.07	2.37
10	1.06	2.32
11	1.05	2.28
12	1.05	2.25
13	1.04	2.23
14	1.04	2.21
15	1.04	2.20
16	1.03	2.18
17	1.03	2.17
18	1.03	2.16
19	1.03	2.15
20	1.03	2.14
21	1.00	2.00

## 附录 F

(资料性)

## 不确定度评估示例(第8章)

## F.1 样品详情

待测样品如下:

一油漆/铝(车身的一部分);

一预期厚度: 25  $\mu\text{m}$  左右;

一基体金属不可触及, 但已通过实验确定了由使用的铝批次(电导率变化)引起的可能的厚度变化(见 D.5): 测量这些使用过的, 代表来自不同供应商、生产批次等, 来自车身生产的无覆盖层铝部件的铝的变化, 在  $t=25 \mu\text{m}$  时产生完整的厚度变化范围:  $\Delta t_{\text{bm}}=\pm 1.2 \mu\text{m}$ .

## F.2 步骤

## F.2.1 示例样品按照以下步骤进行测量

验证探头校准:

1) 使用  $t_r=25.2 \mu\text{m}$  的参考箔片在基体金属上进行10次重复测量(包括在基体金属上调零)2) 参考箔的给定公差:  $T=\pm 0.5 \mu\text{m}$ 

3) 使用的基体金属是选定的参考基体金属(见 D.5)。

4) 结果为  $(n=10): t=24.06 \mu\text{m}$  和  $s(t)=0.11 \mu\text{m}$ 。

5) 计算不确定度和 E (见 8.2):

i) 参考箔的标准不确定度为:

$$u_r = \frac{T}{\sqrt{3}} = \frac{0.5 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0.29 \mu\text{m}$$

ii) 验证测量的标准不确定度(仅考虑随机分量)为:

$$u_{\text{sto}} = t(68.27\%, n-1) \times \frac{s(t)}{\sqrt{n}} = 1.06 \times \frac{0.11 \mu\text{m}}{\sqrt{10}} = 0.04 \mu\text{m}$$

iii) 组合不确定度为  $u_c = \sqrt{(0.04 \mu\text{m})^2 + (0.29 \mu\text{m})^2} = 0.29 \mu\text{m}$ iv) 扩展不确定度为  $U_{\text{cal}}(k=2) = 2 \times u_c = 0.58 \mu\text{m}$ v) 结果为  $E = \frac{|\bar{t} - t_r|}{U_{\text{cal}}(k=2)} = \frac{1.14 \mu\text{m}}{0.58 \mu\text{m}} = 1.96$ vi) 校准不正确。检测到明显偏差, 因为  $E=1.96 > 1$ , 即测量值  $t$  与箔片给定参考值之间的差异

$t - t_r$  大于  $U_{\text{cal}}(k=2) = 0.58 \mu\text{m}$  因此, 可以通过该参考箔片提高校准精度。

b) 使用参考箔调整仪器。

c) 验证改进的探头校准。

1) 10次重复测量(重复步骤 a)

2) 结果 (n=10):  $t=24.87\mu\text{m}$ ,  $s(t)=0.11\mu\text{m}$

3) 校准是正确的, 因为  $E=0.56 < 1$ , 即差值  $t-t_c$  小于  $U_{\text{cal}}(k=2)=0.58\mu\text{m}$ , 现在可以证明没有显着偏差。

d) 计算探头校准的不确定度(步骤 c 的结果)。

$$1) u_c = \sqrt{(0.03\mu\text{m})^2 + (0.29\mu\text{m})^2} = 0.29 \mu\text{m}; U_{\text{ca}} = 0.29\mu\text{m}$$

e) 测量样品。

1) 在样品的给定测量区域内进行七次重复测量。

2) 结果 (n=7):  $t=22.8\mu\text{m}$ ,  $s(t)=0.76\mu\text{m}$

f) 计算所有测量不确定度分量和组合不确定度。

$$1) \text{ 随机不确定性 (见 8.3): } u_{\text{sto}} = t(68.27\%, n-1) \times \frac{s(t)}{\sqrt{n}} = 1.09 \times \frac{0.76\mu\text{m}}{\sqrt{0.7}} = 0.31\mu\text{m}$$

2) 由可能的母材校准偏差引起的标准不确定度(预期厚度变化范围)(见 8.4):  $\Delta t_{\text{bm}}(25\mu\text{m}) = \pm 1.2\mu\text{m}; U_{\text{bm}} = 0.69\mu\text{m}$

3) 组合不确定度(见 8.5):

$$u_o = \sqrt{u_c^2 + u^2 + u_m^2} = \sqrt{(0.29\mu\text{m})^2 + (0.31\mu\text{m})^2 + (0.69\mu\text{m})^2} = 0.81\mu\text{m}$$

g) 计算结果的扩展不确定度和表达式。

1) 扩展不确定度(见 8.5):  $U(k=2) = 2 \times u_c = 1.6 \mu\text{m}$

2) 最终测量结果:  $t = 23\mu\text{m} \pm 1.6\mu\text{m}$

F.2.2 在本例中, 所有其他可能影响测量精度的因素(边缘效应、基体金属厚度、曲率、温度漂移等)都可以忽略不计。

F.2.3 进一步的结论: 很明显, 由此产生的不确定性受到最大不确定性分量的限制, 在这种情况下, 可能是基体金属性能变化(电导率变化)。因此, 增加重复测量的次数会减少  $U_{\text{sto}}$ , 但是, 组合不确定度不会以这种方式受到强烈影响。

附 录 G  
(资料性)  
精密度细节

### G.1 循环测试的一般说明

使用振幅敏感的涡流法测量仪测量覆盖层厚度，进行循环测试以确定精度数据。12个实验室参加了循环测试。

### G.2 样品

对于循环测试，在不同的铝基板上制备了六种不同的覆盖层(见表 G.1)。为了定义测量，在每个样品上分配了五个测量点。

表 G.1 样品

样本编号	基材	覆盖层	覆盖层厚度 大约. $\mu\text{m}$	校准箔片 $\mu\text{m}$
P02	铝	红汽车修复面漆	80	125
P07	铝	绿色电沉积涂层(ED)	20	25
P08	铝	ED涂层+底涂层+透明涂层	120	125
P11	铝	阳极氧化涂层	9	12
P12	铝	蓝色阳极氧化涂层	17	25
P13	铝	铬沉积物	17	25

### G.3 薄膜测厚仪

对于循环测试，使用了来自不同制造商的带有不同类型探头的测厚仪。

### G.4 校准

分别对仪表进行了两点校准(校准箔的零点和厚度)。

使用经过认证的塑料箔执行了两种不同的校准方法。测量基于以下校准：

- 参考方法-R: 在未镀膜的原始样品和样品背面分别使用箔进行校准和调整。这种方法是首选(见 5.2)并且避免了额外的不确定度；

一标准方法-S: 使用无覆盖层铝标准面板上的铝箔进行校准和调整。在这种方法中，由于样品基体金属与无覆盖层标准板的偏差而导致的额外不确定度是可以预测的。

校准箔的厚度为： $12\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$  和  $125\ \mu\text{m}$ 。

在每次校准和调整后立即进行覆盖层厚度测量。

### G.5 测量次数

为了计算重复性极限，对第一个标记点的测量一式三份进行。之后，测量其他四个标记点。

### G.6 评估

#### G.6.1 概述

统计评估按照 ISO 5725-2 和 ISO/TR 22971 进行。对每种校准方法进行了评估。

#### G.6.2 第一个测量点的评估

重复性限值  $r_{x1}$  和再现性限值  $R_{x1}$  是从一式三份测量的第一个测量点计算得出的。

### G.6.3 所有五个测量点的评估

重复性限值  $r_x$  和再现性限值  $R_x$  是根据所有五个测量点计算得出的。对于第一个测量点，使用三次测量的算术平均值。表 G.2 包含从第一个测量点计算的重复性限值和再现性限值的结果，与从所有五个测量点计算的相应限值进行比较。

表 G.2 重复性限值  $r$  和再现性限值  $R$

校准方法	$I_{x1}$ $\mu\text{m}$	$R_{x1}$ $\mu\text{m}$	$r_x$ $\mu\text{m}$	$R_x$ $\mu\text{m}$
12-R	1.0	_a	1.5	_a
12-S	1.0	_a	1.5	_a
25-R	1.6	4.1	2.2	3.7
25-S	1.7	5.0	2.3	5.3
125-R	2.7	5.6	12.3	12.3
125-S	2.3	6.0	12.5	13.0

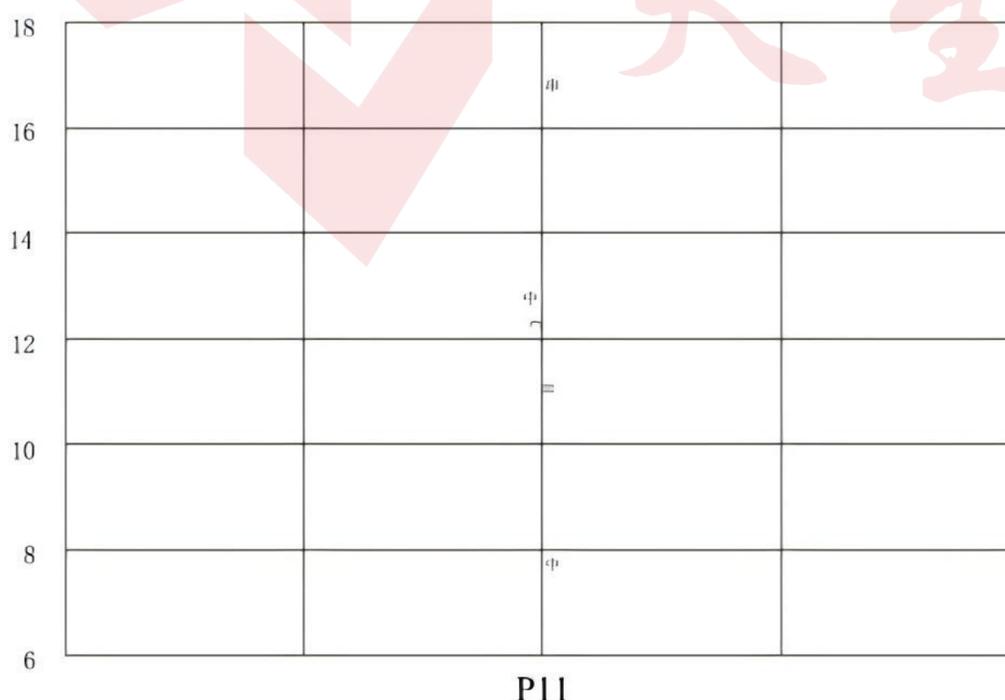
$I_{x1}$  and  $R_{x1}$  第一个测量点的重复性极限和再现性极限(三次测量)。  
 $r_x$  and  $R_x$  所有五个测量点的重复性极限和再现性极限。  
 a 仅对一个样品无法计算  $R_{x1}$  和  $R_x$  的再现性极限。

注意：与125-S相比，125-R的重复性极限  $r_{x1}$  的结果更大可能有几个原因。

图 G.1 至图 G.3 显示了基于三种不同厚度校准箔的厚度测量结果，表中符号说明：

R——参考方法，并且

S——标准方法(另见 G.4)。

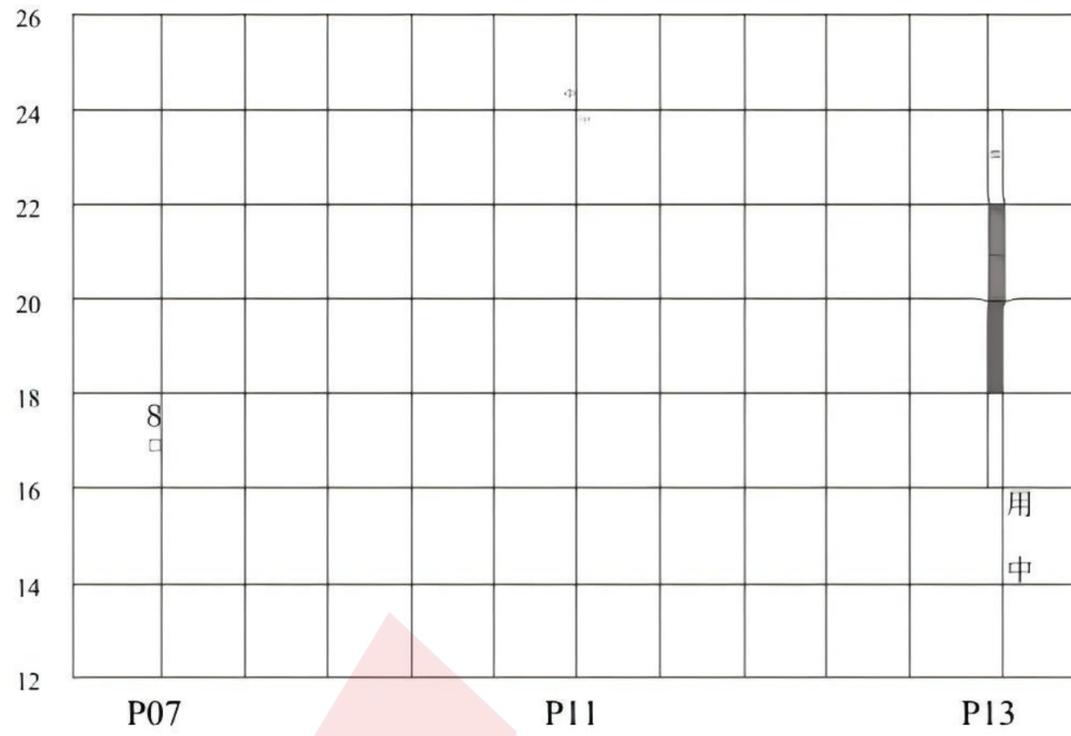


标引序号说明：

○——SD-12-R;

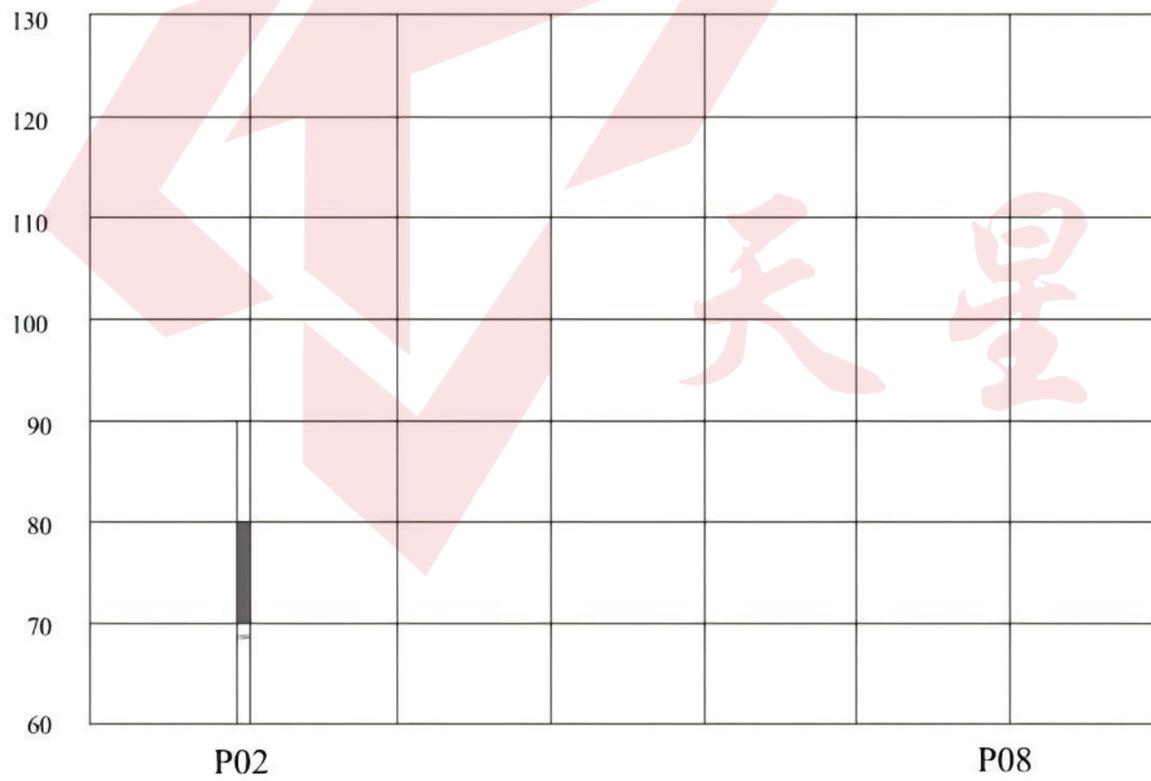
□——SD-12-S。

图 G.1 使用12  $\mu\text{m}$  箔的参考方法和标准方法校准的比较



标引序号说明：  
 ○——SD-25-R；  
 □——SD-25-S。

图 G.2 使用25 μm 筛的参考方法和标准方法校准的比较



标引序号说明：  
 ○——SD-125-R；  
 □——SD-125-S。

图 G.3 使用125 μm 筛的参考方法和标准方法校准的比较

## 参考文献

- [1]GB/T 4956 磁性基材上非磁性覆盖层 覆盖层厚度测量 磁性法 (GB/T 4956-2003,ISO 2178:1982,IDT)
- [2]GB/T 13744 磁性和非磁性基体上镍电镀层 厚度测量方法 磁性法 (GB/T 13744-1992,ISO 2361:1982IDT)
- [3]GB/T 13452.2 色漆和清漆 薄膜厚度的测定 (GB/T 13452.2-2008,ISO 2808:2007,IDT)
- [4]GB/T 6379.1 测量方法与结果的准确度(正确度与精密度) 第1部分: 总则与定义 (GB/T 6379.1-2004,ISO 5725.1:1994,IDT)
- [4]GB/T 6379.2 测量方法与结果的准确度(正确度与精密度)第2部分: 确定标准测量方法重复性与再现性的基本方法 (ISO 5725.2:1994,IDT)
- [5]GB/T 31554 金属和非金属基体上非磁性金属覆盖层覆盖层厚度测量 相敏涡流法 (GB/T 31554-2015,ISO 21968:2005,IDT)
- [6]ISO/IEC Guide 99:2007,International vocabulary of metrology -Basic and general concepts and associated terms(VIM)
- [7]ISO/TR 22971,Accuracy(trueness and precision)of measurement methods and results -Practical guidance for the use of ISO 5725-2:1994 in designing,implementing and statistically analysing interlaboratory repeatability and reproducibility results

---

天星