



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 19346.3—2021/IEC 60404-16:2018

---

## 非晶纳米晶合金测试方法 第3部分：铁基非晶单片试样交流磁性能

Methods of measurement of amorphous and nanocrystalline alloys—  
Part 3: AC magnetic properties of Fe-based amorphous strip using a single  
sheet specimen

(IEC 60404-16:2018, Magnetic materials—  
Part 16: Methods of measurement of the magnetic properties of Fe-based  
amorphous strip by means of a single sheet tester, IDT)

2021-04-30 发布

2021-11-01 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
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 通则 .....	1
4.1 测量方法和原理 .....	1
4.2 试样 .....	3
4.3 磁导计 .....	3
4.4 电源 .....	4
4.5 测量装置 .....	4
4.6 数字采样法 .....	4
5 测量程序 .....	5
5.1 测量原理 .....	5
5.2 测量准备 .....	6
5.3 电源调节 .....	6
6 磁性能的测定 .....	6
6.1 磁极化强度的测定 .....	6
6.2 磁场强度的测定 .....	7
6.3 比总损耗的测定 .....	7
6.4 比视在功率的测定 .....	7
7 检测结果的再现性 .....	8
附录 A (资料性) 单片测试仪测量铁基非晶合金带材的要求 .....	9
A.1 试样形状 .....	9
A.2 H 线圈法 .....	9
A.3 磁轭 .....	9
A.4 连接线 .....	9
A.5 无感精密电阻器 .....	9
A.6 磁屏蔽 .....	10
A.7 不定期检查已安装 H 线圈稳定性的方法 .....	10
附录 B (资料性) 测量磁性能和数字化空气磁通补偿的数字采样法 .....	11
B.1 概述 .....	12
B.2 技术细节和要求 .....	12
B.3 校准 .....	12
B.4 数字空气磁通补偿 .....	12

附录 C (资料性) 数字法对磁极化强度波形正弦的控制 ..... 13

附录 NA (资料性) 检测报告 ..... 14

参考文献 ..... 15

图 1 磁导计示意图 ..... 2

图 2 H 线圈法测量原理示意图 ..... 2

图 3 磁轭尺寸图 ..... 3

图 4 采用数字采样法的 H 线圈法电路图 ..... 5



## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 19346《非晶纳米晶合金测试方法》的第3部分。GB/T 19346 已经发布了以下部分：

- 第1部分：环形试样交流磁性能；
- 第2部分：带材叠片系数；
- 第3部分：铁基非晶单片试样交流磁性能。

本文件使用翻译法等同采用 IEC 60404-16:2018《磁性材料 第16部分：用单片测试仪测量铁基非晶片(带)磁性能的方法》。

与本文件中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 9637—2001 电工术语 磁性材料与元件(eqv IEC 60050-221:1990)；
- GB/T 2900.60—2002 电工术语 电磁学(eqv IEC 60050-121:1998)；
- GB/T 19345.1—2017 非晶纳米晶合金 第1部分：铁基非晶软磁合金带材(IEC 60404-8-11:2017, NEQ)。

本文件做了下列编辑性的修改：

- 纳入了 IEC 60404-16 COR1:2018 的修正内容，修正了式(2)和式(3)，并在正文空白处用垂直双线(∥)标识；
- 为与现有文件系列一致，将文件名称改为《非晶纳米晶合金测试方法 第3部分：铁基非晶单片试样交流磁性能》；
- 增加了资料性附录 NA，检测报告。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本文件起草单位：长沙天恒测控技术有限公司、宝山钢铁股份有限公司、冶金工业信息标准研究院、全球能源互联网研究院有限公司。

本文件主要起草人：周新华、沈杰、周星、栾燕、马光、舒子奇、程灵、王琳、杨富尧、陈兰。

## 引 言

GB/T 19346《非晶纳米晶合金测试方法》目前由三部分构成。

——第1部分：环形试样交流磁性能；

——第2部分：带材叠片系数；

——第3部分：铁基非晶单片试样交流磁性能。

铁基非晶合金带材作为一种有望减少变压器铁芯损耗以此减缓全球变暖的新型材料，需要有一种磁性能测量方法，以实现对其进行分级。

铁基非晶合金带材是通过快速凝固和直接铸造工艺生产的，主要用于制作工频(50 Hz 和 60 Hz)用的配电变压器铁芯。

经过适当的热处理后，其比总损耗与取向电工钢带(片)相比表现出明显较低的水平。并具有因低磁各向异性而导致的低磁滞损耗，以及因高电阻率和厚度减小而导致的低涡流损耗。然而，由于材料的高磁致伸缩和低磁各向异性，其性能会因施加的应力而显著劣化。

因此，需要一种用单片测试仪(SST)测量铁基非晶合金带材磁性能的方法，有别于电工钢片专用的标准 IEC 60404-3<sup>[1]1)</sup>。

本文件中采用了几乎完全适用的功率表法，但是用磁化电流测量磁场强度的常用方法(MC法)不适用于这种材料，因为对厚度更薄及磁性更软的试样，磁轭对损耗测量的影响非常大。因此引入使用H线圈(H线圈法)测量磁场强度的功率表法。针对SST和铁基非晶合金带材试样已经开展过国际循环试验，并由此得出了适合非晶合金材料的SST架构。为了避免这种具有高磁弹性材料和上磁轭间触碰的影响，采用了单磁轭的设计。

---

1) 方括号内的数字指参考文献。

## 非晶纳米晶合金测试方法

### 第 3 部分:铁基非晶单片试样交流磁性能

#### 1 范围

本文件适用于非晶合金带材在频率不高于 400 Hz 下的交流磁性能测量。

本文件给出了用单片测试仪测量非晶合金带材磁性能的基本原理和技术要求。

本文件规定的单片测试仪适用于在规定的频率和磁极化强度峰值且感应电压为正弦状态下,对各种类型的非晶合金带材制成的试样的交流磁性能进行测量。

测量应在环境温度 $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下进行。

注 1: 本文件中的单片测试仪也可用于具有和非晶合金带材类似的磁性能及物理特性的其他材料的测量,如坡莫合金带材、纳米晶合金等。用单片测试仪测量电工钢带(片)磁性能的方法由 IEC 60404-3 规定。

注 2: 本文件所使用的“磁极化强度”术语详见 IEC 60050-121。在早期的一些标准或出版物中,也称“磁通密度”或“磁感应强度”。

#### 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。

IEC 60050-121 国际电工术语 第 121 部分:电磁学(International Electrotechnical Vocabulary—Part 121: Electromagnetism)

IEC 60050-221 国际电工术语 第 221 部分:磁性材料与元件(International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 221: Magnetic materials and components)

IEC 60404-8-11 磁性材料 第 8-11 部分:单项材料规范 半工艺状态交货的铁基非晶带材(Magnetic materials—Part 8-11: Specifications for individual materials—Fe-based amorphous strip delivered in the semi-processed state)

#### 3 术语和定义

IEC 60050-121 和 IEC 60050-221 界定的术语和定义适用于本文件。

#### 4 通则

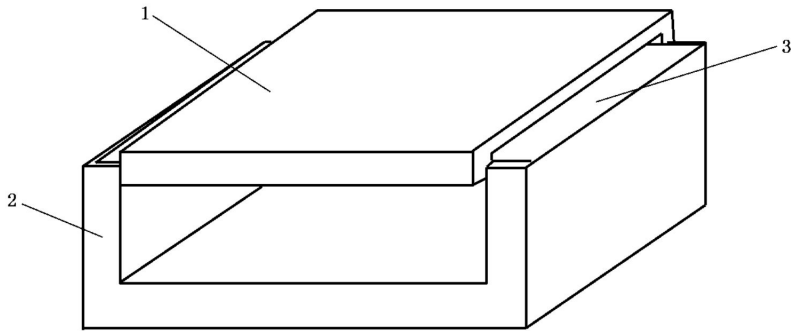
##### 4.1 测量方法和原理

本文件采用磁场线圈测量磁场强度(“H 线圈法”)的功率表法。磁路的闭合由一个单独的 U 形磁轭构成。

将一片非晶合金试样放入以下两个线圈内:

- 初级线圈,外层(磁化线圈);
- 次级线圈,内层(感应电压线圈)。

一个安装在试样下方的 H 线圈,用于检测试样表面的磁场强度。  
闭合磁路的组成部分包括一个单独的 U 形磁轭,磁轭的横截面积远大于试样的横截面积(见图 1)。



标引序号说明:

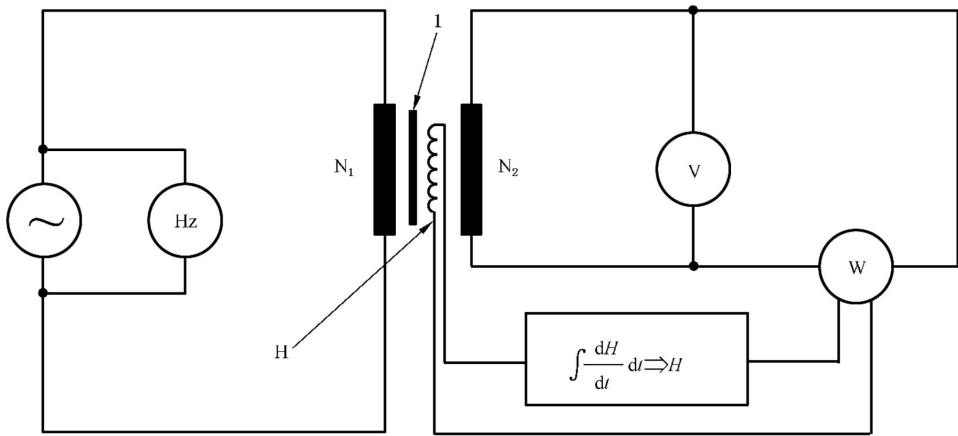
- 1——线圈;
- 2——磁轭;
- 3——试样。

图 1 磁导计示意图

注 1: 附加一个上磁轭会使具有较大磁致伸缩材料的磁性能劣化,因此,测量试样磁性能时不放置上磁轭。但上磁轭仍然可用于在没有试样的条件下对磁轭进行退磁及测量磁轭的损耗。

图 2 是用 H 线圈法的功率表法的测量原理,包括单片磁导计和测量设备的连接。

注 2: 图 2 是按数字采样法的基本原则表述的,其中有些测量功能通过软件实现。关于数字采样法的应用见 4.6 和附录 B。



标引序号说明:

- |                         |   |           |
|-------------------------|---|-----------|
| ~ —— 电源;                | H —— H 线圈;                                    | W —— 功率表; |
| Hz —— 频率计;              | V —— 电压表;                                     | 1 —— 试样。  |
| N <sub>1</sub> —— 初级线圈; | $\int \frac{dH}{dt} dt \Rightarrow H$ —— 积分器; |           |
| N <sub>2</sub> —— 次级线圈; |   |           |

图 2 H 线圈法测量原理示意图

注 3: H 线圈的感应电压  $U_H(t)$  可用于空气磁通的各种补偿方法(见 4.3.4 和 B.4)和次级电压  $U_2(t)$  的正弦波形控制(见 5.3 和附录 C)。

## 4.2 试样

试样应按照 IEC 60404-8-11 的要求制取。

注 1: 铁基非晶合金带材的名义宽度有 142.2 mm、170.2 mm 和 213.4 mm(见 IEC 60404-8-11)。

试样的长度应不小于 280 mm, 即磁轭两磁极的外沿间的距离。虽然位于磁极面外的试样部分对测量的影响比较小, 但是在保证将试样放入和取出方便的前提下, 试样不宜过长。

从铁基非晶合金带材上剪切的试样应为固定长度, 无明显的毛刺或机械变形。试样应平直且为矩形。

试样应按供方推荐的热处理制度在平行于铸造方向的直流磁场中进行磁性退火处理。试样在处理期间应保持平整状态。

注 2: 其他材料的热处理可由供需双方协商确定。

因为试样经过热处理后通常易碎, 拿取试样时应小心, 避免试样变成碎片或者在试样中产生机械应力。

## 4.3 磁导计

### 4.3.1 概述

磁导计包括多个线圈和 U 形磁轭(见图 1)。

环境温度的变化应保持在一定的范围内, 防止因热胀冷缩在试样中产生应力。

### 4.3.2 磁轭

U 形磁轭由软磁铁氧体制成(见图 3), 应有尽可能低的剩磁、磁阻和比总损耗。

注 1: 低品质的磁轭材料会劣化测量品质并造成试样磁性能的错误测量结果(见附录 A)。

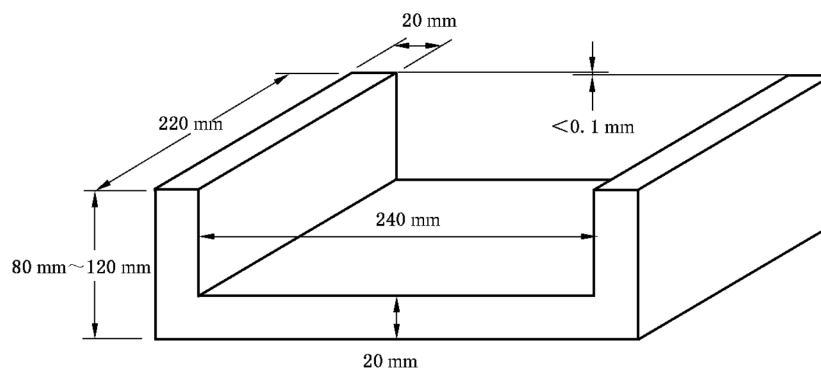


图 3 磁轭尺寸图

磁轭的磁极面宽度应为  $20\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 。

磁轭的两个磁极面应为平面并且共面, 其公差应小于 0.1 mm。磁轭应具有刚性, 以避免在试样中产生机械应力。

磁轭的高度应为 80 mm~120 mm, 宽度应为  $220\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ , 内侧长度应为  $240\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ (见图 3)。

若有测量结果的可比性验证, 也可使用其他尺寸的磁轭。

注 2: 磁轭的损耗可通过在由上下两个相同的磁轭组成的闭磁路上面绕制初级和次级线圈来测量, 初级和次级线圈的匝数有 25 匝即可。

在磁轭竖直臂之间应有放置试样用的非磁性电绝缘支撑物。该支撑物上表面及试样下表面应与磁极面在同一平面上, 以便使试样与磁极面接触的空气间隙最小。

注 3: 如支撑物的表面与磁极面不在同一水平面, 则会劣化磁性能的测量。

### 4.3.3 线圈

初级线圈长度应不小于 230 mm。次级线圈长度应为  $120\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ ，并位于初级线圈的中心位置。初级线圈和次级线圈应绕制在非磁性电绝缘矩形框架上。

框架的尺寸如下：

——用于线圈部分的长度： $235\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ ；

——内部高度： $3\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ ；

——外部高度： $\leq 15\text{ mm}$ ，推荐 12 mm。

初级线圈由一个在整个长度上连续均匀缠绕的线圈制成。比如用铜芯直径为 1.0 mm 的漆包线绕 220 匝并均匀分布在整个框架上，可绕制一层或多层。

次级线圈由一个连续均匀、长度为  $120\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$  的线圈制成，其匝数取决于测量仪器的特性，一般只需绕一层。

H 线圈的长度和次级线圈的长度相同，并位于初级线圈的中心位置。H 线圈应绕制在非磁性电绝缘矩形板上。板的宽度应为  $120\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ ，高度应为  $3\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$ 。

H 线圈应嵌入样品支撑板中，且支撑板上表面和 H 线圈上表面之间的间距应为  $1\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$ 。

H 线圈的匝面积可通过将其放入一个直径和长度足够容纳整个 H 线圈的螺线管所产生的均匀磁场中进行校准。

### 4.3.4 空气磁通补偿

空气磁通对次级电压的影响应进行补偿。

可采用数字空气磁通补偿法实现(见 B.4)。

### 4.3.5 磁屏蔽

建议在单片测试仪上安装简单的磁屏蔽罩，可有效减弱地磁场和外部磁场对试样的磁化(见附录 A)。

## 4.4 电源

电源由一个程控的任意波形发生器和一个功率放大器或者集成这两种功能的仪器组成(见图 4)。

任意波形发生器将合成一个幅值和频率均可通过外部编程调节的磁化波形信号。在任意波形发生器和功率放大器中应插入一个低通滤波器，防止测量信号混叠。

频率的测量准确度应控制在  $\pm 0.1\%$  之内或者更好。

次级电压的波形宜尽可能地保持正弦。不仅应保持次级电压的波形系数在 1.111 的  $\pm 1\%$  范围内，而且应使次级电压的谐波含量尽量少。有很多方式可实现这一要求，如附录 C 介绍的数字方式。

功率放大器应具有低输出阻抗和高稳定度的电压和频率特性，且电压中的噪声足够低。测量过程中，电压和频率应始终稳定在  $\pm 0.2\%$  范围内。

功率放大器应是双极型，具有低噪声和电压、频率宽量程。

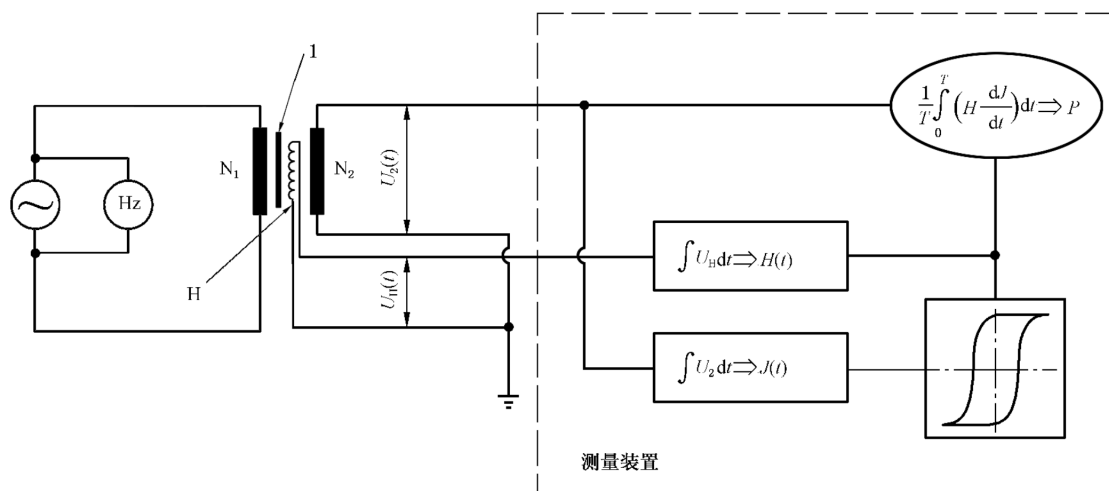
## 4.5 测量装置

测量装置应满足以下要求：在实际的功率因数和峰值因数条件下，功率的测量准确度应控制在  $\pm 0.5\%$  之内或者更好；电压的测量准确度应控制在  $\pm 0.5\%$  之内或者更好。

## 4.6 数字采样法

数字采样法的典型电路完全适用于这种测量，见图 4。在这种情况下，使用 H 线圈和积分器的方式来确定磁场强度(技术细节见附录 B)。测量装置通常由前置放大器、一个数字化仪和一个数字信号分

析仪组成,并由软件提供如图 2 所示的功率表和电压表的功能。



标引序号说明:

$U_2(t)$ ——次级线圈中的感应电压;

$U_H(t)$ ——H 线圈中的感应电压。

其他图例见图 2。

图 4 采用数字采样法的 H 线圈法电路图

注 1: 图 4 中未包含数字空气磁通补偿( $J = B - \mu_0 \times H$ ), 见 4.3.4。

以下信号需要测量:

——次级线圈中的感应电压  $U_2(t)$ ;

——H 线圈中的感应电压  $U_H(t)$ 。

应完整记录一个磁化周期信号  $U_H(t)$  和  $U_2(t)$  的数据集, 为该次测量提供完整信息。

通过磁场测量设备和功率表测量出  $U_H(t)$  和  $U_2(t)$ , 再由此计算出磁场强度  $H(t)$ 、磁极化强度  $J(t)$ 、比总损耗  $P_s$  和比视在功率  $S_s$ , 见第 6 章。

采用数字采样法的测量仪器由各个信号通道已校准的前置放大器, 一个已校准的数字化仪和一个数字信号分析仪组成。测量仪器有两个独立的信号通道同时工作, 分别对应  $U_2(t)$  和  $U_H(t)$ , 其采样时钟应与任意波形发生器的时钟保持同步。也可不同步采样, 但需要更高的采样率以达到相同的精度(见附录 B)。

为避免增加次级线圈的负载, 信号通道应有足够高的输入阻抗(典型值在并联约 100 pF 情况下  $>1 \text{ M}\Omega$ )。即使在功率因数最低时, 各通道之间的相位移也应足够小。

数字信号分析仪通过测量软件计算磁性能。

数字信号分析仪产生数字反馈信号给任意波形发生器, 任意波形发生器通过数字方式实现磁极化强度的波形为正弦波(见附录 C)。

数字采样法也应满足 4.5 的规定。

注 2: 数字采样法的技术细节和要求见附录 B。

## 5 测量程序

### 5.1 测量原理

装置与线圈按图 2 或图 4 连接。

如果使用数字采样法,次级线圈感应电压  $U_2(t)$  和 H 线圈中感应电压  $U_H(t)$  应作为时间函数信号测量。

磁场强度  $H(t)$ 、磁极化强度  $J(t)$ 、比总损耗  $P_s$  和比视在功率  $S_s$  由  $U_H(t)$  和  $U_2(t)$  计算得出。

注:数字采样法的技术细节和要求见附录 B。

## 5.2 测量准备

试样长度和试样质量的测量准确度应在  $\pm 0.1\%$  范围内。装入试样并使其处在线圈纵轴和横轴的中心。

试样的横截面积按式(1)计算:

$$A = \frac{m}{l\rho_m} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$A$  ——试样的横截面积,单位为平方米( $m^2$ );

$m$  ——试样的质量,单位为千克(kg);

$l$  ——试样的长度,单位为米(m);

$\rho_m$  ——被测材料的密度,单位为千克每立方米( $kg/m^3$ )。

试样在测量前应进行退磁,初始退磁场值要高于被测的磁场强度值,通过缓慢减小相应的励磁电流到零进行退磁。

## 5.3 电源调节

通常需要在特定频率下设定单个或一组磁极化强度峰值  $\hat{J}$  和磁场强度峰值  $\hat{H}$ 。

测量比总损耗  $P_s$ 、比视在功率  $S_s$ 、磁场强度的有效值  $\tilde{H}$  和磁场强度峰值  $\hat{H}$ ,需要通过调整电源来设置磁极化强度峰值  $\hat{J}$ 。

测量磁极化强度峰值  $\hat{J}$ ,需要设置磁场强度峰值  $\hat{H}$ 。

在一个或几个磁化周期中测量  $U_H(t)$  和  $U_2(t)$ ,然后由式(2)和式(3)分别计算得到  $\hat{J}$  和  $\hat{H}$  的值。

电源的输出应缓慢增加直到  $\hat{J}$  或  $\hat{H}$  达到设定值,在测量过程中电源的输出不应过冲。

次级电压的波形  $U_2(t)$  应保证只有基波。另外,  $H(t)$  和  $J(t)$  构成的磁滞回线应保持中心对称。

## 6 磁性能的测定

### 6.1 磁极化强度的测定

磁极化强度  $J(t)$  按式(2)计算:

$$J(t) = \frac{1}{N_2 A} \left\{ \int_0^t U_2(\tau) d\tau - \frac{1}{T} \int_0^T \left( \int_0^t U_2(\tau) d\tau \right) dt \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$J(t)$  ——磁极化强度,单位为特斯拉(T);

$N_2$  ——次级线圈的匝数;

$A$  ——试样的横截面积,单位为平方米( $m^2$ );

$U_2(\tau)$  ——次级感应电压,单位为伏特(V);

$\tau$  ——辅助时间变量。



## 6.2 磁场强度的测定

磁场强度  $H(t)$  按式(3)计算:

$$H(t) = \frac{1}{\mu_0 (N_H A_H)} \left\{ \int_0^t U_H(\tau) d\tau - \frac{1}{T} \int_0^T \left( \int_0^t U_H(\tau) d\tau \right) dt \right\} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$H(t)$  —— 磁场强度,单位为安培每米(A/m);

$\mu_0$  —— 常数,真空中的磁导率,  $(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$ ;

$N_H A_H$  ——  $H$  线圈的匝面积,单位为平方米( $\text{m}^2$ );

$U_H(\tau)$  ——  $H$  线圈的感应电压,单位为伏特(V);

$\tau$  —— 辅助时间变量。

注:  $H$  线圈的匝面积的测量方法见 4.3.3。

## 6.3 比总损耗的测定

比总损耗  $P_s$  对应于磁场强度  $H(t)$  和磁极化强度  $J(t)$  组成的磁滞回线所包络的面积。

按式(4)计算:

$$P_s = \frac{f}{\rho_m} \int_{t=0}^T H(t) \frac{dJ(t)}{dt} dt = \frac{f}{\rho_m N_2 A} \int_{t=0}^T H(t) U'_2(t) dt \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$P_s$  —— 试样的比总损耗,单位为瓦特每千克(W/kg);

$\rho_m$  —— 被测材料的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg/m}^3$ );

$f$  —— 磁化频率,单位为赫兹(Hz);

$T$  —— 磁化周期,  $T = 1/f$ ,单位为秒(s);

$N_2$  —— 次级线圈的匝数;

$A$  —— 试样的横截面积,单位为平方米( $\text{m}^2$ );

$H(t)$  —— 磁场强度,单位为安培每米(A/m);

$J(t)$  —— 磁极化强度,单位为特斯拉(T);

$U'_2(t)$  —— 空气磁通补偿后的次级感应电压,单位为伏特(V)。

注: 空气磁通补偿,  $J = B - \mu_0 \times H$ , 见 4.3.4。

## 6.4 比视在功率的测定

比视在功率  $S_s$  按式(5)计算:

$$S_s = 2\pi f \frac{1}{\rho_m} \tilde{H} \cdot \tilde{J} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$S_s$  —— 试样的比视在功率,单位为伏安每千克(VA/kg);

$f$  —— 磁化频率,单位为赫兹(Hz);

$\rho_m$  —— 被测材料的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg/m}^3$ );

$\tilde{H}$  —— 磁场强度  $H(t)$  的有效值,单位为安培每米(A/m);

$\tilde{J}$  —— 磁极化强度  $J(t)$  的有效值,单位为特斯拉(T)。

## 7 检测结果的再现性

按照本文件规定的方法测量,检测结果的再现性在 1.3 T 和 1.4 T 的比总损耗的相对标准偏差为 3%或者更小,80 A/m 时的磁极化强度峰值的相对标准偏差约为 1%,在 1.3 T 和 1.4 T 的比视在功率的相对标准偏差约为 6%。

注:检测报告的内容可参考附录 NA。

## 附录 A

(资料性)

## 单片测试仪测量铁基非晶合金带材的要求

## A.1 试样形状

试样应平整地放置在磁导计中,因为非晶合金带材有高磁弹性,所以非晶合金带材形状的小形变均会导致其磁性能劣化。

不宜使用 IEC 60404-6<sup>[2]</sup>规定的环形试样进行测量,因为铁基非晶合金带材制成环样后,其直径的微小改变通常是无法避免的,由此获得的磁性能会劣化。

## A.2 H 线圈法

常规功率表法测量磁化电流的磁场强度(MC 法)的结果包含了磁轭的磁性能,所以它不适合测量薄的和低损耗的材料,比如铁基非晶合金带材。相比之下,H 线圈的功率表法(H 线圈法)只测量了样品中间一部分的磁性能而不包含磁轭的磁性能。因此,MC 法测量的损耗值通常比 H 线圈法测量的损耗值要高。

使用 H 线圈法,关键是把 H 线圈的输出信号与次级线圈的输出信号进行共地处理,见图 4。它能有效地减少高频噪声对 H 线圈信号的干扰。同时 H 线圈应具有更大的匝面积并使用低噪声的前置放大器将 H 线圈信号放大。推荐使用一个纯净的直流电源给前置放大器供电,可使其免受工频噪声的干扰。

采用多周期同步平均的信号可有效去除信号中的噪声,但对工频干扰引起的噪声作用不大。

## A.3 磁轭

磁轭的材料在低磁化条件下应具有低的剩磁与比总损耗,以减少试样的直流偏磁。软磁铁氧体材料是制作磁轭的理想材料。

单磁轭比双磁轭更合适。因为非晶合金带材对压力很敏感,在磁轭磁极面部分的试样受到上磁轭自重产生的压力,磁性能会劣化;而且,如果试样的两端被夹在磁轭磁极面时,铁基非晶合金带材较大的磁致伸缩会在材料上产生应力。比起单磁轭中磁通量的非对称转换引起薄的试样中的涡流损耗,这些因素产生的影响更大。

## A.4 连接线

H 线圈感应的电压  $U_H(t)$  是很微弱的,而且很容易引入高频噪声。为了降低输出信号的噪声,线圈与测量设备之间的连线应按图 4 连接,每组连线在测量设备前面连接到一点并做共地处理。

## A.5 无感精密电阻器

励磁电流的测量使用一个准确度优于  $\pm 0.1\%$  的无感精密电阻器以实现数字法对磁极化强度波形正弦的控制(见附录 C)。为了减小磁极化强度波形的失真,电阻值一般不超过  $1\ \Omega$ 。

无感精密电阻器应为额定功率满足要求的四端电阻,其两个电流端串联在初级线圈中,两个电位端连接到测量装置的输入通道中。

## A.6 磁屏蔽

最好在单片测试仪上安装磁屏蔽罩,因为非晶合金带材的磁导率很高,而且与有取向材料相比,在铸造方向上有微弱的各向异性,所以,尽管磁导计的磁轴与地磁场方向成直角,地磁场在很大程度上还是可在与主轴成斜角的方向对试样进行磁化。磁屏蔽罩可避免外部磁场对试样产生不必要的磁化。

## A.7 不定期检查已安装 H 线圈稳定性的方法

在将 H 线圈安装到线圈架后,H 线圈的匝面积可通过将 H 线圈和一个参考 H 线圈放入没有试样的线圈中间得到的磁场强度峰值的比较来确定。参考 H 线圈应先在均匀磁场中校准。

另一种简单的方法是不使用参考线圈,即在没有试样的测量装置中,在初级线圈中输入稳定且已知的励磁电流,将 H 线圈的输出与之前记录的参考值进行比较。这种简单方法的优点是避免了通过参考线圈的定位引入的误差。

注: H 线圈的匝面积可通过将其放入一个直径和长度足够容纳整个 H 线圈的螺线管所产生的均匀磁场中进行校准,见 4.3.3。

## 附录 B

(资料性)

## 测量磁性能和数字化空气磁通补偿的数字采样法

## B.1 概述

数字采样法是一种先进的技术,完全适用于本文件测量程序的电气部分<sup>[3]~[5]</sup>。

将其应用到 H 线圈法中,即将次级感应电压  $U_2(t)$  和 H 线圈的感应电压  $U_H(t)$  数字化,通过分析这些数据来测定试样的磁性能。

因此,这些电压的瞬时值  $u_{2j}$  和  $u_{Hj}$  ( $j$  为采样序列值下标)由采样保持电路在一个窄小和等距的时间段内对此与时间相关的电压信号同步采样并保持。然后由模数转换器(ADC)立即将它们转换成数字值。在一个或多个周期内采样的数据对集,以及试样和设置参数,提供了一次测量的完整信息。可用计算机处理此数据集,并测定本文件所涉及的所有磁性能。

数字采样法应用于本文件的主体部分所述的测量程序。图 4 所示的 H 线圈的功率法电路采用的数字采样法是基于图 2 所示电路原理;数字采样法允许通过数字采样装置和软件组合系统实现图 2 中测量设备的所有功能。通过计算软件实现部分或全部测量功能。磁极化强度正弦波的控制也可通过数字采样法来实现,不过其计算过程不同于本附录。更多信息参考附录 C。

本附录有助于理解本文件采用的数字采样法所能达到的精度的影响。需要特别注意的是,因为用 ADC 电路、瞬态记录仪和支持软件很容易构建数字采样功率表,而数字采样法可产生较低的不确定度,但使用不当会造成较大的误差。

注:数字采样法的原理和实现在很多论文和书上有深入的介绍。如果要深入了解,可参考这些出版物<sup>[6]~[8]</sup>,此处不再详述。

## B.2 技术细节和要求

数字采样法的原理是用有限的时间间隔  $\Delta t$  替代无限小的时间间隔  $dt$  对电压进行离散取值,见式(B.1):

$$\Delta t = \frac{T}{n} = \frac{1}{f \cdot n} = \frac{1}{f_s} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$\Delta t$  ——采样点的间隔时间,单位为秒(s);

$T$  ——励磁周期的长度,单位为秒(s);

$n$  ——一个周期内的采样数;

$f$  ——励磁频率,单位为赫兹(Hz);

$f_s$  ——采样频率,单位为点数每秒( $s^{-1}$ )。

为获得更低的不确定度,励磁周期的长度除以采样点间的时间间隔,即  $f_s/f$ ,需为整数(奈奎斯特条件),采样频率  $f_s$  应大于输入信号带宽的两倍<sup>[7]</sup>。

磁导计的连接见图 4。功率电源通常由一个可编程的数字信号发生器和一个功率放大器组成。在任意波形发生器和功率放大器之间应插入一个防混叠的低通滤波器。测量设备应由每个信号通道的前置放大器、一个已校准的数字化仪和一个数字信号分析仪(通常是一台个人电脑)组成,前置放大器将输入信号放大到适合数字化的高信噪比电压。

测量仪器将次级线圈中感应的电压和 H 线圈中感应的电压同步数字化为瞬时值  $u_{2j}$  和  $u_{Hj}$ 。数字

信号分析仪将  $u_{2i}$  和  $u_{Hi}$  的数据阵列在一个磁化周期内分别转换成电压为  $U_2(t)$  和  $U_H(t)$  的数字信号。

磁极化强度  $J(t)$  由  $U_2(t)$  根据式(2)计算得出。

磁场强度  $H(t)$  由  $U_H(t)$  根据式(3)计算得出。

比总损耗  $P_s$ , 即  $J(t)$  和  $H(t)$  形成的磁滞回线的面积, 由式(4)计算得出。

数字信号集  $U_2(t)$  和  $U_H(t)$  可由计算机处理, 或使用数字信号处理器(DSP)在没有中间储存的情况下使用足够快的数字乘法器和加法器进行处理。只有当采样频率  $f_s$  和励磁频率  $f$  是由一个共用的高频时钟导出, 使  $f_s/f$  比为正整数, 才能保证满足奈奎斯特条件。

此时,  $U_H(t)$  和  $U_2(t)$  使用具有足够精度的每周期进行 128 个点采样的方式进行扫描(1 000 Hz 以上每周期 64 个点采样就足够了)。根据香农定理, 这个数字是由  $H(t)$  信号中的最高相关频率决定的, 通常不高于常规频率中的第 41 次谐波<sup>[9]</sup>。但是, 一些商用数据采集设备可能与励磁频率不同步, 因此,  $f_s/f$  的比值不是整数, 即不满足奈奎斯特条件。在这种情况下, 采样频率应大大提高(每周期 500 个点采样或更高), 以使真实周期长度与最接近的采样点时间的偏差保持较小。在较高频率下应用, 采用相对较低的频率采样应满足奈奎斯特条件。建议使用抗混叠低通滤波器<sup>[7]</sup>, 以消除不相关的高频分量, 否则会与数字采样过程相互作用产生混叠噪声<sup>[8]</sup>。

关于幅值分辨率, 文献<sup>[7],[9]</sup>研究表明, 在 12 位分辨率以下数字化误差较大, 特别是对于高硅含量的无取向材料。因此, 推荐采用给定幅值至少 12 位的分辨率。此外, 两个传输信号的电压通道之间不应发生明显的相移。在中频测量中一个特别重要的条件是该相移应很小, 以确保不影响保证本文件所规定的功率测量的不确定度(即 0.5%)。功率因数  $\cos(\varphi)$  越低, 相移偏差的影响就越大( $\varphi$  是两个电压信号的基波分量之间的相位差)。信号放大器最好是直流耦合, 以避免任何低频相移。但是, 信号放大器中的直流偏置可导致数字计算结果的显著误差。可用数字矫正补偿去除此直流偏置。

### B.3 校准

本文件的再现性验证要求对测量设备进行仔细校准。测量装置能通过一个已校准的交流标准源溯源到国家标准上<sup>[8]</sup>。将交流标准源连接到输入信号通道, 然后对每个信号通道在不同频率下的信号幅值、各信号通道之间的相位移进行校准, 并在数字信号分析仪中进行修正。任何情况下, 均不可使用标准样品校准设备, 因为非晶合金带材对重复测量过程中可能施加在样品上的应力非常敏感。

### B.4 数字空气磁通补偿

数字空气磁通补偿可用类似于互感器的原理来实施。使用 H 线圈法, 磁通补偿按式(B.2)计算:

$$U_{2c}(t) = U_{2m}(t) - C \cdot U_H(t) \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

$U_{2c}(t)$  ——补偿后的次级感应电压, 单位为伏特(V);

$U_{2m}(t)$  ——未补偿的次级感应电压, 单位为伏特(V);

$C$  ——补偿系数;

$U_H(t)$  ——H 线圈的感应电压, 单位为伏特(V)。

补偿系数值的调整: 在磁导计中无试样的情况下, 当交流电通过初级励磁线圈时, 补偿电压应不超过测量仪器次级线圈上未补偿电压的 0.1%, 对应最大磁场强度的条件如 80 A/m。

数字空气磁通补偿的优势在于可避免由于使用互感器而引起的和频率相关的相移和线圈阻抗的增大。

## 附录 C

(资料性)

## 数字法对磁极化强度波形正弦的控制

采用传统的模拟反馈方法很难使磁极化强度波形达到规定的正弦。当磁极化强度增加到超过磁化曲线膝点时,有可能产生不稳定和自振荡。采用数字反馈的方法可免受自振荡效应的影响。忽略寄生电容的影响,反馈到任意波形发生器的电压  $U_g(t)$  可通过式(C.1)计算<sup>[4]、[5]、[10]、[11]</sup>。

$$U_g(t) = \frac{1}{G} \left( N_1 \left( A \frac{dJ(t)}{dt} + \mu_0 A_1 \frac{dH(t)}{dt} \right) + R_s I(t) \right) = \frac{1}{G} \left( A N_1 \frac{dJ(t)}{dt} + \frac{\mu_0 A_1 N_1^2}{l_m} \frac{dI(t)}{dt} + R_s I(t) \right) \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

$U_g(t)$  —— 反馈到任意波形发生器的电压,单位为伏特(V);

$G$  —— 功率放大器的增益;

$N_1$  —— 初级线圈的匝数;

$N_2$  —— 次级线圈的匝数;

$J(t)$  —— 设定的磁极化强度,单位为特斯拉(T);

$H(t)$  —— 磁场强度,单位为安培每米(A/m);

$I(t)$  —— 磁化电流,单位为安培(A);

$A$  —— 试样的横截面积,单位为平方米( $m^2$ );

$A_1$  —— 初级线圈的有效横截面积,单位为平方米( $m^2$ );

$l_m$  —— 约定有效磁路长度,单位为米(m),  $l_m = 0.24 \text{ m}$ ;

$\mu_0$  —— 磁性常数,真空中的磁导率( $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ );

$R_s$  —— 磁化电路的总串联电阻,单位为欧姆( $\Omega$ )。

还有另一种控制信号波形的计算方法。第( $i+1$ )步反馈给程控任意波形发生器的电压  $U_{i+1}(t)$  可由式(C.2)计算得出。在这种情况下,电压  $U_{i+1}(t)$  可根据次级线圈的被测感应电压  $U_2(t)$  与设定点的次级线圈的感应电压  $U_J(t)$  的差值计算得出。一旦达到磁极化规定的波形因数数值 1.111 的  $\pm 1\%$  范围内,迭代停止。

$$U_{i+1}(t) = U_i(t) + K \frac{N_1}{G N_2} [U_J(t) - U_2(t)] \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

$U_{i+1}(t)$  —— 第( $i+1$ )步反馈给任意波形发生器的电压,单位为伏特(V);

$K$  —— 负反馈常数,小于 1 的正数;

$G$  —— 功率放大器的增益;

$U_J(t)$  —— 当达到设定的磁极化强度时计算出的次级线圈的感应电压,单位为伏特(V);

$U_2(t)$  —— 次级线圈的感应电压,单位为伏特(V)。

因为用数字方式控制信号是一个磁化、采集信号、退磁和控制信号的重复过程,所以信号控制的总时间比模拟方式更长。为了减少总的控制时间,可采用特制的能在信号  $U_i(t)$  到  $U_{i+1}(t)$  之间不停切换的装置来省略退磁过程。

附 录 NA

(资料性)

检 测 报 告

如适用,检测报告可包括以下内容:

- a) 本文件编号;
- b) 试样基本参数:试样的名称、编号、质量、密度、尺寸和有效截面积等;
- c) 如适用,试样状态及热处理制度;
- d) 测量条件:测量频率、磁场强度或磁极化强度和波形系数等;
- e) 使用的测量方法;
- f) 测量的环境条件;
- g) 测量结果。



## 参 考 文 献

- [1] IEC 60404-3:2010 Magnetic materials—Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester
- [2] IEC 60404-6:2003 Magnetic materials—Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens
- [3] ISHIHARA, Y. Investigation on measurement methods of magnetic properties of Fe-based amorphous strip based for an IEC standard. *Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics*, 48 (2015) p.113-122
- [4] BIRKELBACH, G. HEMPEL, K. A. and SCHULTE, F. J. Very low frequency magnetic hysteresis measurements with well-defined time dependence of the flux density. *IEEE Trans. on Magn.*, MAG-22(1986)p.505-507
- [5] BERTOTTI, G., FERRARA, E., FIORILLO, F. and PASQUALE, M., Loss measurement on amorphous alloys under sinusoidal and distorted induction waveform using a digital feedback technique. *J. Appl. Phys.*, 73(1993)p.5375-5377
- [6] De WULF, M. and MELKEBEEK, J. On the advantage and drawbacks of using digital acquisition systems for the determination of magnetic properties of electrical steel sheet and strip. *J. Magn. Mater.*, 196-197 (1999) p.940-942
- [7] STERNS, S.D. *Digital signal analysis*. 5<sup>th</sup> Edition, Hayden Book (1991), ISBN: 0-8104-5828-4
- [8] AHLERS, H. Precision calibration procedure for magnetic loss testers using a digital two-channel function generator. *SMM 11 Venice 1993, J. Magn. Mater.*, vol 133 (1994) p.437-439
- [9] AHLERS, H. and SIEVERT, J. Uncertainties of Magnetic Loss Measurements, particularly in Digital Procedures. *PTB-Mitt.* 94 (1984) p.99-107
- [10] LÜDKE, J. and AHLERS, H. Hybrid control used to obtain sinusoidal curve form for the power loss measurement on magnetic materials. *Proceedings of the EMMA Conference 2000: Materials Science Forum*, vols 373-376 (2001) p.469-472
- [11] FIORILLO, F. *Measurement and characterization of magnetic materials*. Elsevier Series in Electromagnetism. Academic Press (2004), ISBN: 0-12-257251-3





中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准

非晶纳米晶合金测试方法

第3部分:铁基非晶单片试样交流磁性能

GB/T 19346.3—2021/IEC 60404-16:2018

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)  
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址:www.spc.org.cn

服务热线:400-168-0010

2021年4月第一版

\*

书号:155066·1-67321

版权专有 侵权必究



GB/T 19346.3-2021



码上扫一扫 正版服务到