

中华人民共和国国家标准

GB/T 3655—2008/IEC 60404-2:1996
代替 GB/T 3655—2000

用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带) 磁性能的方法

Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet
and strip by means of an Epstein frame

(IEC 60404-2:1996, IDT)

2008-10-10 发布

2009-05-01 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 交流测量的通则	1
4 比总损耗的测量步骤	4
5 磁极化强度峰值、磁场强度有效值、磁场强度峰值、比视在功率的测定	6
6 直流测量的通则	8
7 直流磁极化强度的测定	9
8 测试报告	10
附录 A (资料性附录) 次级感应电压正弦波形的数字控制方法	11
附录 B (资料性附录) 波形因数修正	12
附录 C (资料性附录) 剪切试样引入的内应力对爱泼斯坦方圈法测量结果的影响	13

前 言

本标准等同采用 IEC 60404-2:1996《磁性材料 第 2 部分:用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法》(英文版),主要内容和结构与 IEC 60404-2:1996 一致。

为了便于使用,本标准做了下列编辑性的修改:

- “本部分”(指 IEC 60404 第 2 部分)一词改为“本标准”;
- 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”;
- 删除国际标准的前言;
- 规范性引用文件按对应的国家标准作了变更;
- 重新编排图片的位置;
- 测试报告增加了部分内容;
- 增加附录 A、附录 B 和附录 C。

本标准代替 GB/T 3655—2000《用爱泼斯坦法测量电工钢片(带)磁性能的方法》。

本标准与 GB/T 3655—2000 相比,主要内容变化如下:

- 原 3.5 对电压和频率的要求由“应保持恒定在 $\pm 0.1\%$ 之内”改为“ $\pm 0.2\%$ ”;
- 取消原第 8 章;
- 替换原附录 A 和附录 C;
- 修改原附录 B。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 均为资料性附录。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:宝山钢铁股份有限公司、武汉钢铁(集团)公司、冶金工业信息标准研究院。

本标准主要起草人:胡志远、周星、李和平、冯超、任翠英、姚腊红、刘其中。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 3655—1992、GB/T 3655—2000。

用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带) 磁性能的方法

1 范围

本标准适用于晶粒取向和晶粒无取向电工钢片(带)频率上限为 400 Hz 的交流磁性能的测量及直流磁性能的测量。

本标准的目的是明确用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的通则和技术细节。

爱泼斯坦方圈适用于测量由各级别电工钢片(带)制取的试样。其交流磁性能的测定是在给定的磁极化强度峰值(或磁场强度的峰值)和给定的频率及正弦感应电压的情况下进行的。

测量在环境温度 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行,测试前试样应先退磁。

更高频率下的测量应根据 GB/T 10129 的规定进行。

注:本标准所使用的“磁极化强度”,在其他相关标准中,有使用“磁通密度”和“磁感应强度”的情况。在常规的测量条件下,上述不同定义的物理量之间的量值差别可以忽略。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 3102.5—1993 电学和磁学的量和单位(neq ISO 31-5:1992, Quantities and units—Part 5: Electricity and magnetism)

GB/T 10129—1988 电工钢片(带)中频磁性能测量方法(neq IEC 60404-10:1988, Magnetic materials—Part 10: Methods of measurement of magnetic properties of magnetic steel sheet and strip at medium frequencies)

GB/T 19289 电工钢片(带)的密度、电阻率和叠装系数的测量方法(GB/T 19289—2003, IEC 60404-13:1995, Magnetic materials—Part 13: Methods of measurement of density, resistivity and stacking factor of electrical steel sheet and strip, MOD)

IEC 60404-4:2000 软磁材料 第4部分:软磁材料直流磁性能的测量方法

IEC 60404-3:1982 单片电工钢片带磁性能测量方法

3 交流测量的通则

3.1 25 cm 爱泼斯坦方圈法的原理

25 cm 爱泼斯坦方圈由初级线圈、次级线圈和作为铁芯的试样组成,它形成一个空载的变压器,其交流特性按照以下描述的方法进行测量。

3.2 试样

试样的样片用双搭接接头方式(见图 1)装成一个方框,并形成长度和横截面积都相等的四束。

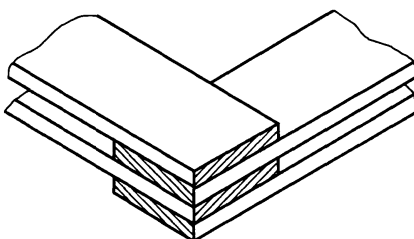


图 1 双搭接方式

样片应按照相关的产品标准要求制取。

样片应使用不产生明显边缘毛刺的方法剪切,如果有要求,应根据相关的产品标准进行热处理。样片应具有以下尺寸:

——宽度: $b=30\text{ mm}\pm 0.2\text{ mm}$;

——长度: $280\text{ mm}\leq l\leq 320\text{ mm}$ 。

样片长度的公差为 $\pm 0.5\text{ mm}$ 。

当要沿轧制方向或垂直该方向剪切样片时,应以母板的轧制方向为参考。

对于规定方向和实际剪切方向之间的角度,应满足下面的公差:

——对于晶粒取向电工钢片为 $\pm 1^\circ$;

——对于晶粒无取向电工钢片为 $\pm 5^\circ$ 。

样片应平直。测量应在无附加绝缘的情况下进行。

组成试样的样片数应是4的倍数,并且符合相关的产品标准规定。对于长度为280 mm的试样,试样的有效质量至少为240 g,按公式(1)计算。

3.3 25 cm 爱泼斯坦方圈

25 cm 爱泼斯坦方圈(以下简称爱泼斯坦方圈)由四个线圈组成,构成试样的样片插入其中(见图2)。

爱泼斯坦方圈应包含一个用于空气磁通补偿的互感线圈。

支撑线圈的绕组骨架由硬的绝缘材料制成,如酚醛树脂纸板。绕组骨架具有矩形横截面,其内部宽度为32 mm。推荐高度约为10 mm。

线圈安装在一个绝缘的无磁性的底板上,形成一个方框(见图2)。由样片的内缘形成的正方形边长为 220_{-0}^{+1} mm (见图2)。

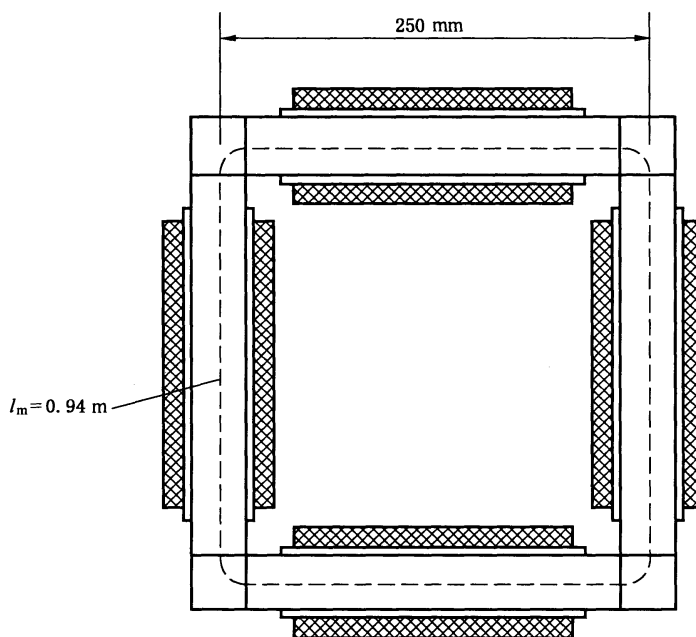


图2 标准25 cm爱泼斯坦方圈

4个线圈中的每一个都应有2个绕组:

——初级绕组,外层(磁化绕组);

——次级绕组,内层(感应电压绕组)。

注:在这些绕组之间可以加一层静电屏蔽。

绕组应该均匀分布在至少190 mm的长度上,每个线圈的匝数应为总线圈匝数的四分之一。

4个线圈的各初级绕组应串联,各次级绕组也应串联。初级和次级线圈的匝数应与电源、测量仪器

和频率的特定条件匹配。

注：常规使用的线圈总匝数推荐为 700 匝或 1 000 匝。

为了尽可能降低绕组阻抗的影响，方圈的结构应满足以下要求：

$$\frac{R_1}{N_1^2} \leq 1.25 \times 10^{-6} \Omega \quad \frac{R_2}{N_2^2} \leq 5 \times 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} \leq 2.5 \times 10^{-9} \text{ H} \quad \frac{L_2}{N_2^2} \leq 2.5 \times 10^{-9} \text{ H}$$

式中：

R_1 ——初级线圈的电阻，单位为欧姆(Ω)；

R_2 ——次级线圈的电阻，单位为欧姆(Ω)；

L_1 ——初级线圈的电感，单位为亨利(H)；

L_2 ——次级线圈的电感，单位为亨利(H)；

N_1 ——初级线圈的匝数；

N_2 ——次级线圈的匝数。

注：例如，有下列特性的绕组满足上述条件：

——总匝数： $N_1 = 700, N_2 = 700$ ；

——初级绕组(外层)：四个线圈各用标称截面积约为 1.8 mm^2 的双股铜线并排密绕三层，计 175 匝；

——次级绕组(内层)：四个线圈各用标称截面积为 0.8 mm^2 的单股铜线绕一层，计 175 匝。

磁回路有效磁路长度 l_m ，按约定取 0.94 m 。因此，有效质量 m_a ，即待测试样的磁性有效质量，按公式(1)计算：

$$m_a = \frac{l_m}{4l} m \dots\dots\dots (1)$$

式中：

m_a ——试样的有效质量，单位为千克(kg)；

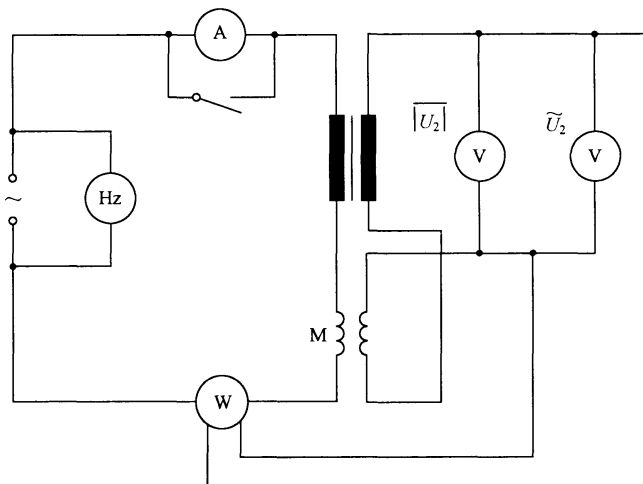
m ——试样的总体质量，单位为千克(kg)；

l ——试样条片长度，单位为米(m)；

l_m ——约定的有效磁路长度，单位为米(m) ($l_m = 0.94 \text{ m}$)。

3.4 空气磁通补偿

空气磁通补偿的互感线圈放置在 4 个线圈所围空间的中心，其轴线垂直于 4 个线圈轴线构成的平面。互感线圈的初级绕组应与爱泼斯坦方圈的初级绕组串联，互感线圈的次级绕组应与爱泼斯坦方圈的次级绕组反方向串联(见图 3)。



M——空气磁通补偿的互感线圈。

图 3 功率表法的电路原理图

互感值应按以下方式调节,当爱泼斯坦方圈中无试样时,在初级绕组中通一交流电流,使在次级绕组非公共端间测量的电压不大于爱泼斯坦方圈次级绕组本身电压的 0.1%。

这样,在串联次级绕组中感应电压整流后的平均值正比于试样中磁极化强度的峰值。

3.5 电源

电源应具有低内阻和高度稳定的电压和频率。在测量时,电压和频率应保持恒定在±0.2%之内。

对于比总损耗、比视在功率和磁场强度的有效值测量,次级电压的波形因数应该为 1.111±1%。

注:可以用几个方式达到要求,例如使用一个电子控制的电源或负反馈电源放大器。次级电压的波形因数是其有效值与整流平均值之比。附录 A 描述了次级感应电压正弦波形的数字控制方法。

需要用两个电压表来测量次级电压的波形因数,一个用于测量次级电压的有效值,一个用来测量次级电压整流后的平均值。

注:次级感应电压的波形宜用一个示波器来检验,以确保只存在基波分量。

3.6 电压测定

爱泼斯坦方圈次级电压的测量应使用具有内阻不小于 1 000 Ω/V 的电压表测量。

3.6.1 平均值电压表

应使用具有整流后平均值测量准确度为±0.2%或更好的电压表。

注:优先使用的仪表是数字电压表。

3.6.2 有效值电压表

应使用具有有效值测量准确度为±0.2%或更好的电压表。

注:优先使用的仪表是数字电压表。

3.6.3 峰值电压表

应使用具有峰值测量准确度为±0.2%或更好的电压表。

3.7 频率测量

应使用具有准确度为±0.1%或更好的频率计。

3.8 功率表

应使用在实际功率因数和波形因数下准确度为±0.5%或更好的功率表。

功率表电压回路的直流电阻至少应为其电抗的 5 000 倍,除非功率表对其电抗进行了补偿。

如果在电路里包括电流测量仪表,在调节次级电压和测量损耗时,该仪表应短路。

4 比总损耗的测量步骤

4.1 测量的准备

爱泼斯坦方圈和测量设备应按图 3 连接。

称量试样,称量误差在±0.1%以内。称量后,样片应在拐角处按双搭接方式叠放在爱泼斯坦方圈中,在方圈的每一分支中样片的数目相同,使所形成的内缘正方形边长为 220⁺¹₀ mm。当样片按半数是平行于轧制方向和半数是垂直于轧制方向剪切时,轧制方向剪切的条片应插入方圈的两个相对的分支里,而那些垂直于轧制方向剪切的样片插入另外两个分支里。应注意确保在搭接部分片与片之间的空气间隙尽可能小。允许在每个搭接角处垂直于样片的搭接面施加一个大约 1 N 的力。

待测试样应在一个初始磁场高于先前测试磁场的退磁场下,逐渐降低交流磁场进行退磁。

4.2 电源的调节

电源的输出应缓慢增加,同时观察初级回路的电流表,确保功率表电流回路不过载,直到爱泼斯坦方圈次级电压整流后的平均值 $\overline{|U_2|}$ 达到预定值。 $\overline{|U_2|}$ 预定值由所要求的磁极化强度值通过式(2)计算:

$$\overline{|U_2|} = 4fN_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} A \hat{J} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- $\overline{|U_2|}$ ——是次级线圈感应电压的平均值,单位为伏特(V);
- f ——是频率,单位为赫兹(Hz);
- N_2 ——是次级线圈的匝数;
- R_i ——是次级回路仪表的总电阻值,单位为欧姆(Ω);
- R_t ——是次级绕组和互感的串联电阻,单位为欧姆(Ω);
- A ——是试样的横截面积,单位为平方米(m^2);
- \hat{J} ——是磁极化强度的峰值,单位为特斯拉(T)。

试样的横截面积应按公式(3)计算:

$$A = \frac{m}{4l\rho_m} \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- A ——试样的横截面积,单位为平方米(m^2);
- m ——试样的总质量,单位为千克(kg);
- l ——试样的样片长度,单位为米(m);
- ρ_m ——试样材料密度的约定值,或采用按照 GB/T 19289 方法的测定值,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

4.3 功率的测量

初级回路的电流表应短路,必要时重新调节次级电压。应根据 3.5 的内容测定次级电压的波形因数,然后记录功率表的读数。

4.4 比总损耗的计算

功率表测量的功率 P_m 包含了次级回路中仪表的损耗。因此,试样的总损耗功率 P_c 应按公式(4)计算:

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1.111 \overline{|U_2|})^2}{R_i} \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- P_c ——计算出的试样损耗功率,单位为瓦特(W);
 - N_1 ——初级线圈的匝数;
 - N_2 ——次级线圈的匝数;
 - P_m ——功率表测量的功率,单位为瓦特(W);
 - $\overline{|U_2|}$ ——次级整流电压的平均值,单位为伏特(V);
 - R_i ——次级回路仪表的总电阻,单位为欧姆(Ω)。
- 测量的比总损耗 P_s 按式(5)计算, P_c 除以试样的有效质量 m_a 。

$$P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{P_c 4l}{ml_m} \dots\dots\dots(5)$$

式中:

- P_s ——试样的比总损耗,单位为瓦每千克(W/kg);
- P_c ——计算出的试样总损耗,单位为瓦特(W);
- m_a ——试样的有效质量,单位为千克(kg);
- l ——试样的样片长度,单位为米(m);
- m ——试样的总质量,单位为千克(kg);
- l_m ——约定的有效磁路长度,单位为米(m)。

4.5 比总损耗测量的再现性

使用本章叙述的方法所得到结果的再现性用相对标准偏差表示,在磁极化强度不大于 1.7T 时,晶

粒取向电工钢的测量和不大于 1.5 T 时,晶粒无取向电工钢的测量均为 1.5%。

对于较高磁极化强度下的测量,预计其相对标准偏差将增大。

5 磁极化强度峰值、磁场强度有效值、磁场强度峰值、比视在功率的测定

本章叙述了以下特性的测定方法:

- 磁极化强度峰值 \hat{J} ;
- 磁场强度有效值 \tilde{H} ;
- 磁场强度峰值 \hat{H} ;
- 比视在功率 S_s 。

5.1 试样

试样要求与 3.2 一致。

5.2 测量

5.2.1 磁极化强度的峰值 \hat{J}

磁极化强度的峰值应按照第 4 章叙述的内容,以测量的次级电压整流后的平均值按公式(2)计算得到。

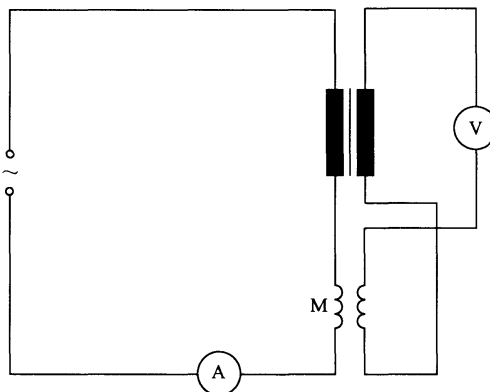
5.2.2 磁场强度的有效值

磁场强度的有效值应由图 4 所示回路中的有效值电流表测量的电流有效值计算得出。另一种方法应使用一个典型值为 0.1 Ω ~1 Ω ,准确度为 0.1%的精密电阻,接入电路取代电流表,再按照 3.6 的要求,用一只测量有效值的电压表测量这个电阻上产生的电压。频率应按需求值设置。根据公式(2)调节爱泼斯坦方圈的次级电压,使磁极化强度的峰值达到设定值。测量并记录电流的有效值。磁场强度的有效值应按公式(6)计算得出:

$$\tilde{H} = \frac{N_1 \tilde{I}_1}{l_m} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- \tilde{H} ——磁场强度的有效值,单位为安培每米(A/m);
- N_1 ——初级线圈的匝数;
- \tilde{I}_1 ——励磁电流的有效值,单位为安培(A);
- l_m ——有效磁路长度,单位为米(m)($l_m=0.94$ m)。



M——空气磁通补偿的互感线圈。

图 4 测量磁化电流有效值的电路原理图

5.2.3 磁场强度的峰值

磁场强度的峰值应由励磁电流的峰值 \hat{I}_1 得出,它是用图 5 所示的峰值电压表,通过测量一个准确

度为 0.1% 的已知阻值的精密电阻 R 上的电压降计算得到。对于这个测量,次级电压的波形因数允许超过规定值(见 3.5)。

磁场强度的峰值应按式(7)计算:

$$\hat{H} = \frac{N_1 \hat{I}_1}{l_m} \dots\dots\dots (7)$$

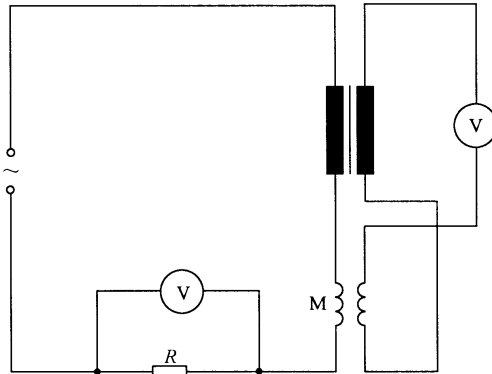
式中:

\hat{H} ——磁场强度的峰值,单位为安培每米(A/m);

N_1 ——初级线圈的匝数;

\hat{I}_1 ——励磁电流的峰值($\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}}{R}$),单位为安培(A);

l_m ——有效磁路长度,单位为米(m)($l_m = 0.94 \text{ m}$)。



M——空气磁通补偿的互感线圈。

图 5 用峰值电压表测量磁场强度峰值的电路原理图

另一种励磁电流 \hat{I}_1 的峰值的测定方法,电路如图 6 所示,应通过测量准确度为 0.5% 的互感器 M_D 次级绕组电压整流后的平均值得出。互感器的初级绕组与爱泼斯坦方圈的初级绕组串联。使用这种方法应确保(如通过观察示波器的波形)该互感器次级绕组的电压波形中,每个周期不应出现两个以上的过零。电压表可以用测量爱泼斯坦方圈次级电压的同一电压表。用这种方法,磁场强度的峰值应按式(7a)计算:

$$\hat{H} = \frac{N_1}{4fM_D l_m} \cdot \frac{R_V + R_m}{R_V} \bar{U}_m \dots\dots\dots (7a)$$

式中:

\hat{H} ——磁场强度的峰值,单位为安培每米(A/m);

N_1 ——初级线圈的匝数;

f ——频率,单位为赫兹(Hz);

l_m ——有效磁路长度,单位为米(m)($l_m = 0.94 \text{ m}$);

M_D ——图 6 所示电路中的互感器的互感值,单位为亨利(H);

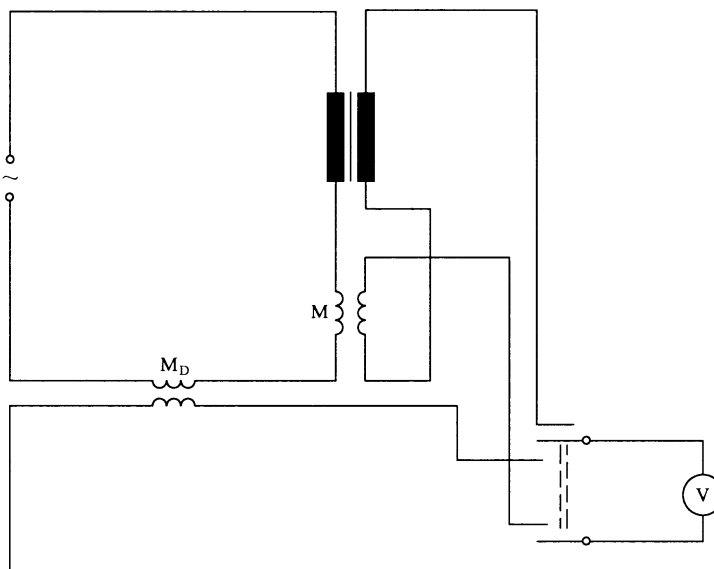
R_m ——次级回路的电阻,单位为欧姆(Ω);

R_V ——平均值电压表的内阻,单位为欧姆(Ω);

\bar{U}_m —— M_D 互感器的次级绕组感应电压整流后的平均值,单位为伏特(V)。

5.2.4 比视在功率

对于设定的磁极化强度和频率值,测量相应的励磁电流(见 5.2.2)和爱泼斯坦方圈次级电压的有效值。电压有效值的测量应使用符合 3.6 要求的电压表,在爱泼斯坦方圈的次级绕组的两端测得。



M——空气磁通补偿的互感线圈。

图 6 用互感器 M_D 测量磁场强度峰值的电路原理图

比视在功率由式(8)给出：

$$S_s = \tilde{I}_1 \tilde{U}_2 \frac{N_1}{m_a N_2} = \tilde{I}_1 \tilde{U}_2 \frac{N_1 4l}{m l_m N_2} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- S_s ——比视在功率,单位为瓦每千克(W/kg)；
- N_1 ——初级线圈的匝数；
- N_2 ——次级线圈的匝数；
- \tilde{I}_1 ——励磁电流的有效值,单位为安培(A)；
- \tilde{U}_2 ——次级线圈电压的有效值,单位为伏特(V)；
- l ——试样的样片长度,单位为米(m)；
- m ——试样的总质量,单位为千克(kg)；
- l_m ——有效磁路长度,单位为米(m)($l_m = 0.94 \text{ m}$)；
- m_a ——试样的有效质量,单位为千克(kg)。

5.3 再现性

使用本章叙述的方法所得到结果的再现性基本上取决于使用的测量仪表的准确度和对测量设备物理细节的关注程度。当所用仪表的准确度为±0.5%或更好时,测量结果的再现性用相对标准偏差表示,约为2%,而比视在功率的再现性用相对标准偏差表示,在2%(对低于磁化曲线膝点的磁极化强度值)到7%(对于接近饱和的磁极化强度值)之间。

6 直流测量的通则

6.1 25 cm 爱泼斯坦方圈法的原理

25 cm 爱泼斯坦方圈由初级线圈、次级线圈和作为铁芯的试样组成,它形成一个空载的变压器,其直流特性按照以下描述的方法进行测量。

6.2 试样

试样与 3.2 要求一致。

6.3 25 cm 爱泼斯坦方圈

爱泼斯坦方圈的结构要求与 3.3 一致。

6.4 空气磁通补偿

空气磁通的补偿要求与 3.4 一致。

6.5 电源

电源应提供能够产生所要求的最大磁场强度的额定电流。其波纹系数应小于 1%，并且电流的稳定性应使所产生的相对磁通量的变化不大于 0.2%。

6.6 设备准确度

6.6.1 磁通积分器

应使用准确度为 ±0.3% 或更好的磁通积分器。

注：磁通积分器应按照 IEC 60404-4:2000 中附录 B 的方式计量。

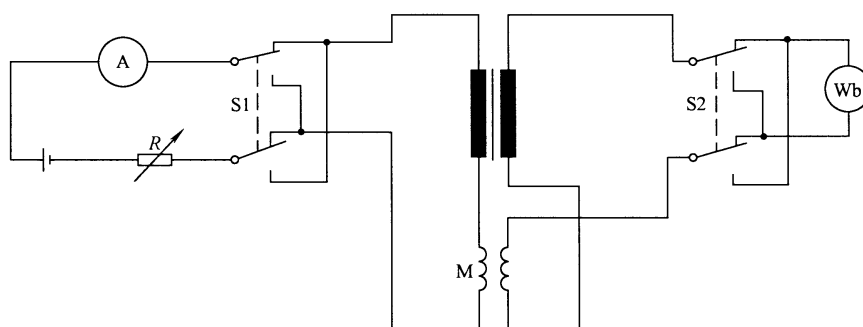
6.6.2 电流表

应使用准确度为 ±0.2% 或更好的电流表。

7 直流磁极化强度的测定

7.1 测量的准备

爱泼斯坦方圈和测量设备应按图 7 连接。



M——空气磁通补偿的互感线圈；
Wb——磁通积分器。

图 7 不连续记录法的直流测试电路原理图

试样按照 4.1 所述内容进行称量并装入爱泼斯坦方圈。

试样应进行退磁，即在不断降低的交流磁场下退磁，或在爱泼斯坦方圈的初级线圈中通一逐渐减小并换向的直流电流进行退磁，换向的频率约为每秒钟两次。退磁电流产生的磁场强度的初始值应比先前测量所用的磁场强度高。

试样的横截面积应按式(3)计算。

7.2 磁极化强度的测定

按图 7 所示，非连续的磁极化强度值可以在相应的磁场强度下测得，或通过一系列非连续值得到磁化曲线。也可以采用连续测量的方法，如图 8 所示，将一个校准的四端电阻与爱泼斯坦方圈的磁化线圈串连，电压的接线端与 X—Y 记录仪的 X 输入端相接，磁通积分器的输出端与 X—Y 记录仪的 Y 输入端相接。也可用绘图仪或计算机接口替代 X—Y 记录仪。

磁场强度应通过测量爱泼斯坦方圈初级线圈的磁化电流，并用公式(9)计算得到：

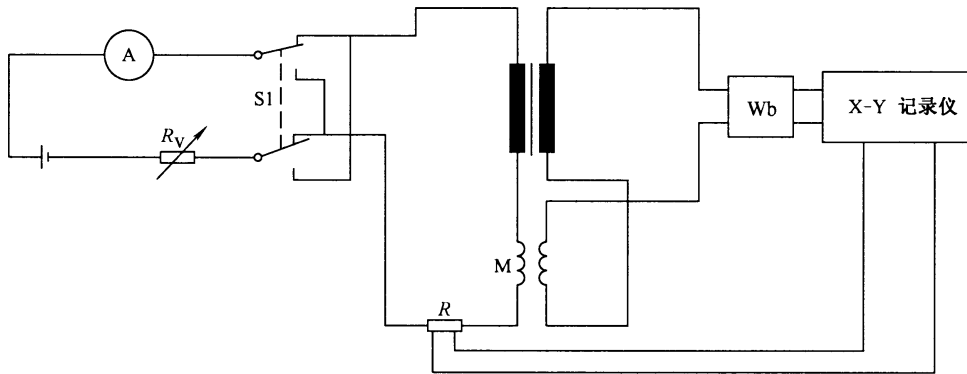
$$H = \frac{N_1 I}{l_m} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

H——磁场强度，单位为安培每米(A/m)；

N₁——爱泼斯坦方圈初级绕组的匝数；

I ——磁化电流,单位为安培(A);
 l_m ——规定的有效磁路长度,单位为米(m)。



M ——空气磁通补偿的互感线圈;
 Wb ——磁通积分器。

图 8 连续记录法的直流测试电路原理图

为了得到非连续的磁极化强度值,磁通积分器应先归零,再增加初级绕组中的电流值,直至磁场强度值达到设定值。

应记录磁化电流和磁通测量值的变化,磁极化强度值应由磁通测量值的变化和磁通积分器的校正系数用式(10)计算:

$$\Delta J = \frac{K_j \alpha_j}{N_2 A} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

- ΔJ ——测量得到的磁极化强度变化值,单位为特斯拉(T);
- A ——试样的横截面积,单位为平方米(m^2);
- N_2 ——爱泼斯坦方圈次级绕组的匝数;
- K_j ——磁通积分器的校正系数,单位为伏特秒(Vs);
- α_j ——磁通积分器的示值。

7.3 磁滞回线的测定

如果需要,磁滞回线应按 IEC 60404-4:2000 的要求测定,只是绕线环样应由爱泼斯坦方圈及爱泼斯坦试样代替。

7.4 磁极化强度测量的再现性

用本章描述的程序获得的结果的再现性用相对标准偏差表示为 1.0%。

8 测试报告

如需要,测试报告应包含下述内容:

- a) 本标准号;
- b) 试样的类型和标识;
- c) 材料的密度(约定值,或按照 GB/T 19289 的测量值);
- d) 样片的长度;
- e) 样片数;
- f) 试样的质量;
- g) 测量过程中的环境温度;
- h) 测量频率(如适用);
- i) 作为测试条件的磁极化强度峰值(或磁场强度的峰值);
- j) 测量结果。

附录 A

(资料性附录)

次级感应电压正弦波形的数字控制方法

为保证次级感应电压是预定的正弦波形,即波形因数满足 $1.111 \pm 1\%$,可采用模拟和数字的反馈技术实现。假设时间函数 $B(t)$ 和 $H(t)$ 构成表示磁滞回线 $B(H)$ 的参数,在此假设条件下,由初级电路电流与时间相关的函数(即 $H(t)$)自动确定 $B(t)$ 函数。运用数字反馈技术时,一台数控的任意波形发生器提供所需的 $H(t)$ 函数。设计一个逐次逼近的叠代方法,在第 i 步中动态的 $H(t)$ 关系被实际的 $B_i(t)$ 和 $H_i(t)$ 函数更新一次,并被用于计算第 $i+1$ 步的函数 $H_{i+1}(t)$ 。一旦次级电压达到预定的波形因数 $1.111 \pm 1\%$,叠代就可以被中止。此计算出的 $H(t)$ 函数应转化成函数 $V_g(t)$,并馈入到任意波形发生器中。 $V_g(t)$ 与 $H(t) = \frac{N_1 I(t)}{l_m}$ 的关系可通过用以下方式解得。设 R_s 表示初级电路总的串联电阻, G 表示功率放大器的增益,忽略寄生电容效应,则:

$$V_g(t) = \frac{1}{G} \left[\frac{R_s H(t) l_m}{N_1} + N_1 A \frac{dB(t)}{dt} \right] \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$$\frac{dB(t)}{dt} = \omega \hat{B} \sin(\omega t)。$$

注:如果试样与磁化绕组之间的空气间隙的影响不能忽略,则(A.1)式中应包含附加项 $V_{\text{air}} = \frac{1}{G} \mu_0 N_1 (A' - A) \frac{dH(t)}{dt}$ 。

附录 B
(资料性附录)
波形因数修正

B.1 概述

在比总损耗测量时应保持磁通即次级感应电压的波形为正弦,要求波形因数(次级感应电压有效值与平均值的比)在 $1.111 \pm 1\%$ 范围内,这一条件可以采用如附录 A 所述的模拟和数字的反馈技术实现。在次级感应电压波形偏离正弦的情况下,即波形因数超出 $1.111 \pm 1\%$ 的范围,一般在 $1.111 \pm 5\%$ 的范围内,最大不超出 $1.111 \pm 10\%$ 时,可考虑按波形因数的具体值对比总损耗测量值进行修正。

通常将比总损耗分解为两个分量,即磁滞损耗和涡流损耗,且认为磁滞损耗与波形因数无关,而涡流损耗则与波形因数有关。在波形因数能准确测定和合理偏离正弦的情况下,经验上可以用改变频率的方法确定涡流损耗在比总损耗中占的比例;其中磁滞损耗与频率成正比,涡流损耗与频率的平方成正比;测量时频率的改变量不能太小,但也不应超过常规测量频率的一半或二倍。

有协议时,常规频率 50 Hz 或 60 Hz,对应磁极化强度峰值的比总损耗测量值,可以使用下面的方式进行修正。

B.2 比总损耗的修正

用式(B.1)可以得到精确的已修正过的比总损耗值:

$$P'_s = \frac{P_s}{h + e \left(\frac{K}{1.111} \right)^2} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- K——波形因数,为次级感应电压的有效值和平均值的比值;
- P_s ——按公式(5)求得的试样的比总损耗,单位为瓦特每千克(W/kg);
- P'_s ——波形失真时比总损耗的修正值,单位为瓦特每千克(W/kg);
- e ——涡流损耗在比总损耗中占的比例;
- h ——磁滞损耗在比总损耗中占的比例,其值等于 $(1 - e)$ 。

B.3 涡流损耗的典型比例系数

表 B.1 电工钢涡流损耗的典型比例系数 e

材料	试样组成	厚度/mm						
		0.18	0.23	0.27	0.30	0.35	0.50	0.65
无取向	纵横向各半	—	—	—	—	0.20	0.30	0.40
	全纵向	—	—	—	—	0.25	0.35	0.45
取向	全纵向	0.35	0.45	0.50	0.50	0.65	—	—

附录 C

(资料性附录)

剪切试样引入的内应力对爱泼斯坦方圈法测量结果的影响

C.1 概述

剪切制备试样过程在试样中所引入的内应力对爱泼斯坦方圈法的测量结果会产生显著影响。

国际电工委员会磁测方法相关技术委员会曾组织过世界不同电工钢生产家和磁测机构按照 IEC 60404-3:1982 进行单片法的比对试验。相关磁性能的测量结果表明各方数据的分散性较大,其中可能的原因是由于各个实验室剪切试样的设备不同造成的。由于各实验室按照各自内部的爱泼斯坦方圈法和单片法的比对实验结果确定其单片磁导计的有效磁路长度,此时有效磁路长度包含了各自剪切爱泼斯坦方圈样片引入的内应力的影响,而不同实验室剪切爱泼斯坦试样引入的内应力水平不同,这可能是按照 IEC 60404-3:1982 用单片法测量磁性能时实验的再现性差的原因。

C.2 无取向电工钢的实例

在同一块无取向电工钢板(50W600)的相邻部位切取 4 块 320 mm×320 mm 的大单片试样(按顺序记为 1#至 4#),以 GB/T 13789 的单片法分别测量组合成两组的单片试样,使两组试样的磁性指标尽可能接近。测量后选择 1#和 4#为一组,2#和 3#为另一组。单片样测量结果见表 C.1。

表 C.1 单片样比总损耗和磁极化强度的单片法测量值

试 样	$P_{10/50}/(\text{W/kg})$	$P_{15/50}/(\text{W/kg})$	$J_{25/50}/\text{T}$	$J_{50/50}/\text{T}$
2#和 3#	1.880	4.254	1.604	1.677
1#和 4#	1.881	4.258	1.604	1.677
两组试样间相对偏差/%	-0.08	-0.10	-0.01	0.01

用两台不同的剪切机将上述单片样制成爱泼斯坦条样,其中 1#和 4#单片样用一台剪切机剪成一副爱泼斯坦试样,2#和 3#试样用另一台剪切机剪成一副爱泼斯坦试样,两副爱泼斯坦试样由同一实验室同一人用同一台设备按本标准进行测量,测量结果见表 C.2。

表 C.2 爱泼斯坦样比总损耗和磁极化强度的爱泼斯坦法测量值

试 样	$P_{10/50}/(\text{W/kg})$	$P_{15/50}/(\text{W/kg})$	$J_{25/50}/\text{T}$	$J_{50/50}/\text{T}$	备注
1#和 4#	2.054	4.562	1.602	1.688	普通钢板剪切机
2#和 3#	1.801	4.114	1.614	1.696	电工钢专用剪切机
两组试样间相对偏差/%	14.0	10.9	-0.78	-0.47	—

C.3 说明

考虑到大单片样边部由于剪切引入的内应力的区域面积占试样总面积的比例较小,此时由剪切引入的内应力的影响可以忽略,所以单片法测量的结果之间一致性较好;而对于爱泼斯坦方圈法,虽然试样材料的磁性能一致,并且由同一个人采用同一台设备进行测量,但是因为爱泼斯坦试样剪样设备的不同而引入的内应力水平不同(普通钢板剪切机状态较差),两种剪样状态对应的比总损耗测量值的相对偏差非常显著,对应的磁极化强度测量值的相对偏差也比较明显,超出了产

品性能表征可接受的范围。

由于试样制备过程的加工在试样上所引入的内应力对爱泼斯坦试样的测量结果会产生显著影响，应注意对剪切设备和相关试样状态的控制，所引入的内应力水平越低，其测量的磁性能指标越接近电工钢板的真实值。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)
磁性能的方法

GB/T 3655—2008/IEC 60404-2:1996

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

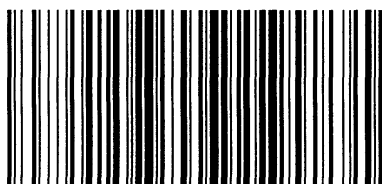
*

开本 880×1230 1/16 印张 1.25 字数 29 千字
2009年2月第一版 2009年2月第一次印刷

*

书号:155066·1-35411 定价 18.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533



GB/T 3655-2008