ICS 29.030
CCS L 19

中华人民共和国国家标准

GB/T 43870.1—2024

磁性材料居里温度的测量方法 第1部分:永磁材料

Measurement methods for Curie temperature of magnetic materials— Part 1:Permanent magnetic materials

2024-04-25 发布　　2024-11-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

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　居里温度测量值的确定 …… 1
5　居里温度的测量 …… 2
5.1　振动样品(线圈)磁强计法 …… 2
5.1.1　测量原理 …… 2
5.1.2　样品 …… 2
5.1.3　测量装置 …… 2
5.1.4　标准样品 …… 3
5.1.5　测量程序 …… 3
5.1.6　数据处理 …… 4
5.2　磁称法 …… 4
5.2.1　测量原理 …… 4
5.2.2　样品 …… 5
5.2.3　测量装置 …… 5
5.2.4　标准样品 …… 6
5.2.5　测量程序 …… 6
5.2.6　数据处理 …… 7
5.3　抽拉法 …… 7
5.3.1　测量原理 …… 7
5.3.2　样品 …… 7
5.3.3　测量装置 …… 7
5.3.4　测量程序 …… 8
5.3.5　数据处理 …… 9
6　结果报告 …… 9
附录 A（资料性）　常见永磁材料的居里温度典型值 …… 10
参考文献 …… 11

图 1　m-T 曲线及居里温度 T_C 图示 …… 1
图 2　振动样品磁强计法测量装置示意图 …… 3

图 3　磁称法测量装置示意图(磁化装置为电磁铁) …… 6
图 4　抽拉法测量装置示意图 …… 8

表 A.1　常见永磁材料的居里温度典型值 …… 10

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 43870《磁性材料居里温度的测量方法》的第1部分。GB/T 43870已经发布了以下部分：

——第1部分：永磁材料；

——第2部分：软磁材料。

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。

本文件由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本文件由全国磁性元件与铁氧体材料标准化技术委员会(SAC/TC 89)归口。

本文件起草单位：中国计量大学、中国电子科技集团公司第九研究所、中国计量科学研究院、北矿磁材科技有限公司、浙江省计量科学研究院、长沙天恒测控技术有限公司、横店集团东磁股份有限公司、浙江中科磁业股份有限公司。

本文件主要起草人：吴琼、葛洪良、王子生、彭清贵、龚文杰、刘荣明、虞志书、周新华、何震宇、黄益红、泮敏翔、杨杭福、俞能君。

引　言

居里温度是铁磁性/亚铁磁性材料内部磁矩从有序到无序的转变温度，也即铁磁性/亚铁磁性和顺磁性相互转变的温度，是铁磁性材料的基本特征之一。居里温度测量是磁特性测量的一部分。

GB/T 43870《磁性材料居里温度的测量方法》由两个部分构成。

——第 1 部分：永磁材料。目的在于规定永磁材料居里温度的测量方法。

——第 2 部分：软磁材料。目的在于规定软磁材料居里温度的测量方法。

磁性材料居里温度的测量方法
第1部分：永磁材料

1 范围

本文件描述了永磁材料居里温度的测量方法。

本文件适用于铝镍钴永磁、铁氧体永磁、铁铬钴永磁、稀土永磁及其他永磁材料居里温度的测量。

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 2900.60 电工术语 电磁学

GB/T 9637 电工术语 磁性材料与元件

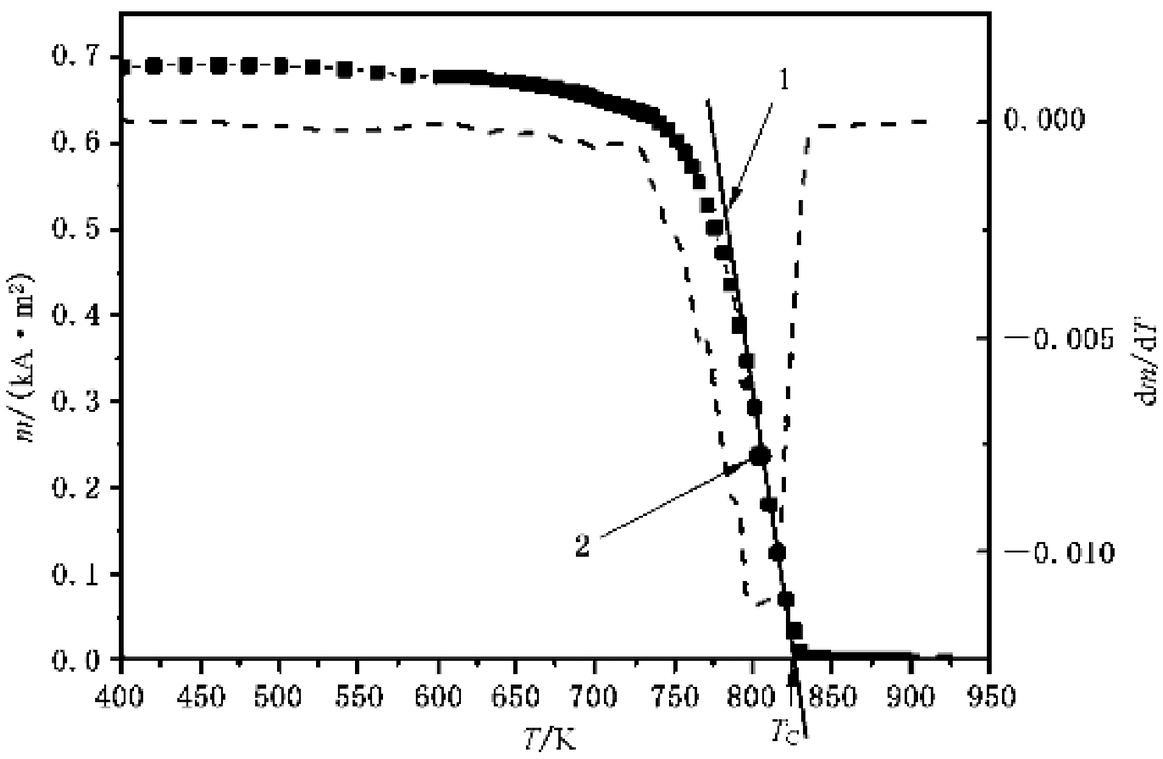
GB/T 38437—2019 用抽拉或旋转方式测量铁磁材料样品磁偶极矩的方法

3 术语和定义

GB/T 2900.60 和 GB/T 9637 界定的术语和定义适用于本文件。

4 居里温度测量值的确定

测量磁矩 m 随温度 T 的变化曲线(m-T 曲线)，曲线斜率($\mathrm{d}m/\mathrm{d}T$)绝对值最大处的切线与 $m=0$ 横轴的交点，此处的温度值即为居里温度，如图1所示。



标引序号说明：

1——经过 $\mathrm{d}m/\mathrm{d}T$ 绝对值最大处的切线；

2——$\mathrm{d}m/\mathrm{d}T$ 绝对值最大点。

-■-■- m

- - - $\mathrm{d}m/\mathrm{d}T$

图1 m-T 曲线及居里温度 T_C 图示

5 居里温度的测量

5.1 振动样品(线圈)磁强计法

5.1.1 测量原理

基于电磁感应原理,能够测量在一组探测线圈中心以固定频率和振幅作相对微振动样品的磁矩。对于可视为磁偶极子的小样品,探测线圈中的感应电动势 e 见公式(1)。

$$e = Gm\omega a\cos\omega t \quad \cdots\cdots(1)$$

式中:

e ——探测线圈中的感应电动势,单位为伏特(V);

G ——线圈几何因子,与线圈的几何形状和位置有关,由仪器系统决定;

m ——样品的磁矩,单位为安平方米($A \cdot m^2$);

ω ——样品的振动频率,单位为赫兹(Hz);

a ——样品的振幅,单位为米(m);

t ——样品的振动时间,单位为秒(s)。

探测线圈中的感应电动势与样品的磁矩 m、振动频率 ω 和振幅 a 成正比,与线圈几何因子有关。由于线圈几何因子难以确定,一般采用已知磁化强度值的标准样品进行相对测量,见公式(2)。

$$m = \frac{e_i}{e_0} \cdot m_0 \quad \cdots\cdots(2)$$

式中:

m ——样品的磁矩,单位为安平方米($A \cdot m^2$);

e_i ——样品的感应电动势,单位为伏特(V);

e_0 ——标准样品的感应电动势,单位为伏特(V);

m_0 ——标准样品的磁矩,单位为安平方米($A \cdot m^2$),由标准样品的质量乘以比饱和磁化强度得到。

将样品置于控温装置中,控制温度变化,则能测量出样品的磁矩 m 随温度 T 的变化曲线(m-T 曲线)。

5.1.2 样品

样品宜为块体。基于磁偶极子近似,样品的最大尺寸应不超过 4 mm,可固定于样品杆末端。样品应呈磁中性状态。

5.1.3 测量装置

测量装置主要由电磁铁、探测线圈、磁强计、控温装置和温度传感器构成,如图 2 所示。具体要求如下。

a) 电磁铁

在测量空间范围内,电磁铁磁场不均匀性应不超过 1%;在测量过程中,电磁铁磁场的波动性应不超过 1%。

b) 探测线圈和样品装置

探测线圈固定于电磁铁的磁极间,轴与外场垂直,且与振动方向平行。样品应固定在与振动器相连的非磁振动臂上,置于电磁铁的轴上,并与两侧的探测线圈对称。

振动方向(z 方向)应与电磁铁的 y 轴成 90°,即垂直于磁场方向,振幅一般不大于 2 mm,频率一般为 20 Hz~200 Hz。样品在 x 方向和 y 方向的运动偏离程度不大于 z 方向运动的 1%,必要

时可采用反馈环来稳定振幅。

c) 磁强计

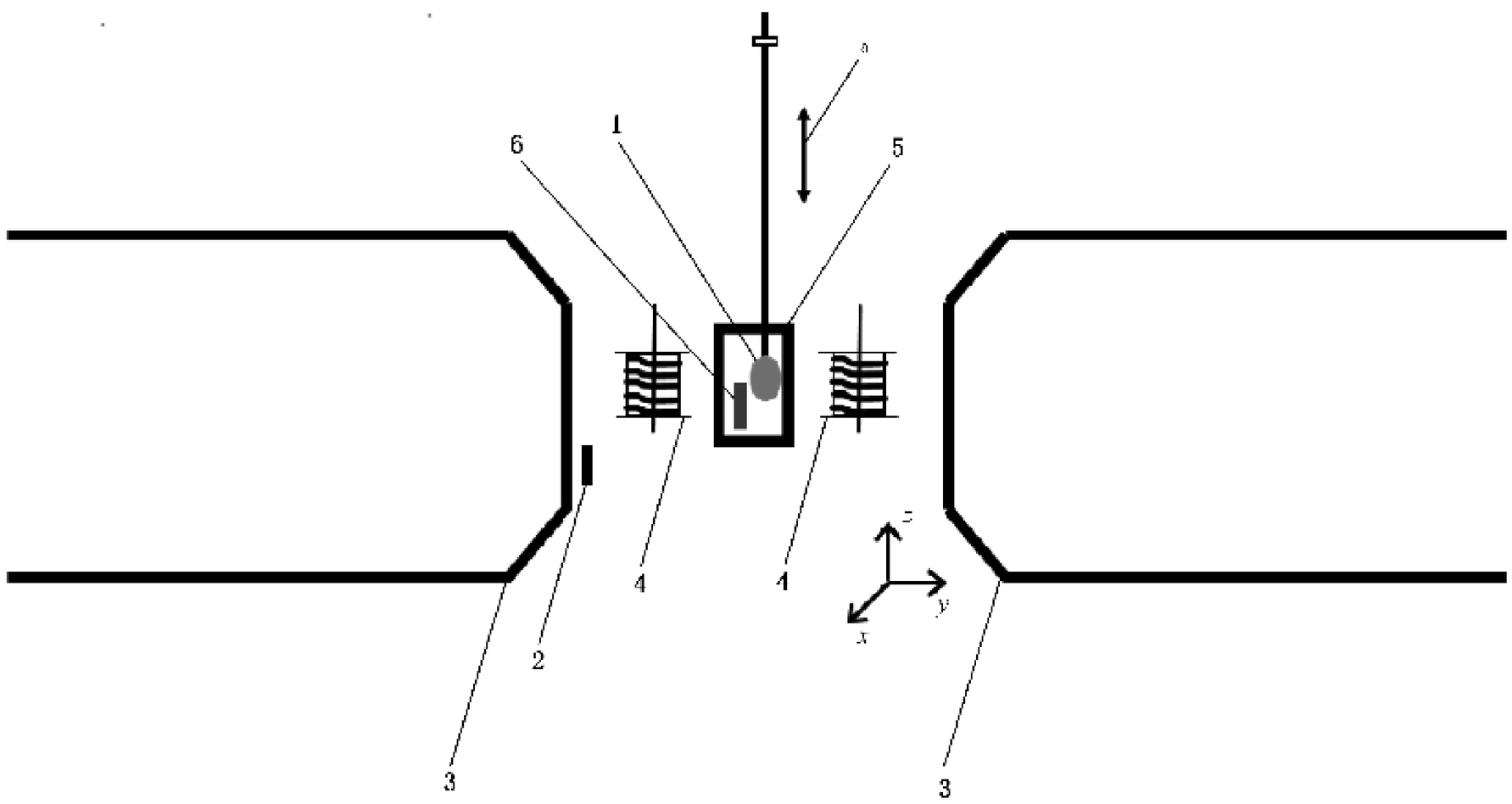
采用霍尔效应磁强计测量磁极间的磁场强度。在磁场强度测量范围内，最大允许误差一般不超过±0.5%。

d) 控温装置

控温装置采用非导磁材料；室温至200 ℃时最大允许误差一般不超过±2.0 ℃，200 ℃～1 000 ℃时最大允许误差一般不超过±3.0 ℃；其最高温度应高于样品的居里温度；其大小应能放置于电磁铁极头之间。

e) 温度传感器

宜采用热电偶测量温度 T，热电偶的最大允许误差应优于±0.75%，分辨率应优于0.1 ℃。热电偶应尽量靠近样品。



标引序号说明：

1——样品；

2——磁强计；

3——电磁铁；

4——探测线圈；

5——控温装置；

6——温度传感器。

[a] 振动方向。

图2 振动样品磁强计法测量装置示意图

5.1.4 标准样品

采用一个已知饱和磁化强度的标准样品进行定标。通常用纯度为99.99%以上的镍做成已知磁矩的球状标准样品、柱状标准样品、立方标准样品、片状标准样品中的一种。最大尺寸不超过4 mm。

注：密度为8.90 g/cm^3、纯度为99.99%的镍在23 ℃时通常采用的饱和磁化强度值为485.6 kA/m。

5.1.5 测量程序

5.1.5.1 测量环境条件

应在下列环境条件下进行测量：

a) 温度：18 ℃～28 ℃；

b) 相对湿度：20%～80%。

5.1.5.2 预热

测量前振动样品磁强计应在样品杆振动状态下预热。

5.1.5.3 置零

霍尔效应磁强计使用前应在零高斯腔(磁通密度不大于 1×10^{-6} T)中置零。磁极间放空样品杆,使空样品杆处于零磁场状态,即为磁矩零点。

5.1.5.4 定标

将标准样品放置于探测线圈的中心位置(即鞍点)。对标准样品施加特定磁场,沿磁场方向(x 轴)调节样品位置,找出其磁矩最小的位置;沿垂直磁力线所在面方向(y 轴)调节样品位置,找出磁矩最大的位置;沿样品振动方向(z 轴),找出磁矩最大的位置,该位置即为探测线圈鞍点。用特定磁场下标准样品的磁矩值对仪器进行定标。

5.1.5.5 放置样品

将样品放置在控温装置内探测线圈鞍点位置(定标时标准样品所在位置)。对于各向异性样品,应使样品的易磁化方向沿外磁场方向;对于易氧化样品,应对控温装置抽真空或通入惰性气体保护处理。

注:将样品放置在探测线圈鞍点位置后,施加 10 mT 以内的磁场,旋转样品,磁矩最大的方向即为样品的易磁化方向。

5.1.5.6 测试

对样品外加 10 mT 以内的磁场,待磁场稳定后,控温装置从室温开始升温至每个测量温度点,并保温足够时间(至少稳定 1 min),使样品与箱内温度达到热平衡,待磁矩值稳定后读取磁矩数据,并记录控温装置温度,获得 m-T 曲线。

在低于预估居里温度 50 ℃内升温速率应不超过 1 ℃/min。在低于预估居里温度 10 ℃左右时,每个测量温度点的间隔不超过 1 ℃。

5.1.6 数据处理

用数据处理软件对 m-T 曲线求导,得到 $\mathrm{d}m/\mathrm{d}T$ 曲线,再将 $\mathrm{d}m/\mathrm{d}T$ 绝对值最大处的 m-T 曲线的切线与 $m=0$ 横轴的交点处的温度确定为居里温度。

5.2 磁称法

5.2.1 测量原理

磁称法是通过测量样品在非均匀磁场中所受的力来确定样品的磁矩 m。样品受力 F_z 见公式(3)。

$$F_z=\mu_0 m\frac{\partial H_y}{\partial z} \qquad \cdots\cdots(3)$$

式中:

F_z ——样品在 z 方向上的受力,单位为牛顿(N);

μ_0 ——磁常数($\approx4\pi\times10^{-7}$ H/m);

m ——样品的磁矩,单位为安平方米($\mathrm{A\cdot m^2}$);

$\frac{\partial H_y}{\partial z}$ ——z 方向上的磁场梯度,单位为安每平方米($\mathrm{A/m^2}$)。

已知磁场梯度和样品受力,由公式(3)能够得出样品的磁矩 m。

一般采用已知磁矩的标准样品进行比较，按照公式(4)计算样品的磁矩 m：

$$m = \frac{F_z}{F_0} \cdot m_0 \qquad \cdots\cdots(4)$$

式中：

m ——样品的磁矩，单位为安平方米($A \cdot m^2$)；

F_z ——样品在 z 方向上的受力，单位为牛顿(N)；

F_0 ——标准样品的受力，单位为牛顿(N)；

m_0 ——标准样品的磁矩，单位为安平方米($A \cdot m^2$)。

将样品置于控温装置中，通过控制温度变化，能够测量出样品的磁矩 m 随温度 T 的变化曲线(m-T 曲线)。

5.2.2 样品

样品宜为块体，最大尺寸应不超过 4 mm。样品应呈磁中性状态。

5.2.3 测量装置

测量装置主要由电磁铁、天平、控温装置和测量支架构成，如图 3 所示。具体要求如下。

a) 电磁铁

电磁铁极头直径应不小于 40 mm。在测量空间范围内，电磁铁磁场不均匀性应不超过 1%；在测量过程中，电磁铁磁场的波动性应不超过 1%。

b) 天平

天平的量程应不小于 200 g，分辨率应优于 0.1 mg。为避免空气扰动对测量的影响，应有无磁防风罩保护天平。

c) 控温装置

同 5.1.3 d)。

d) 温度传感器

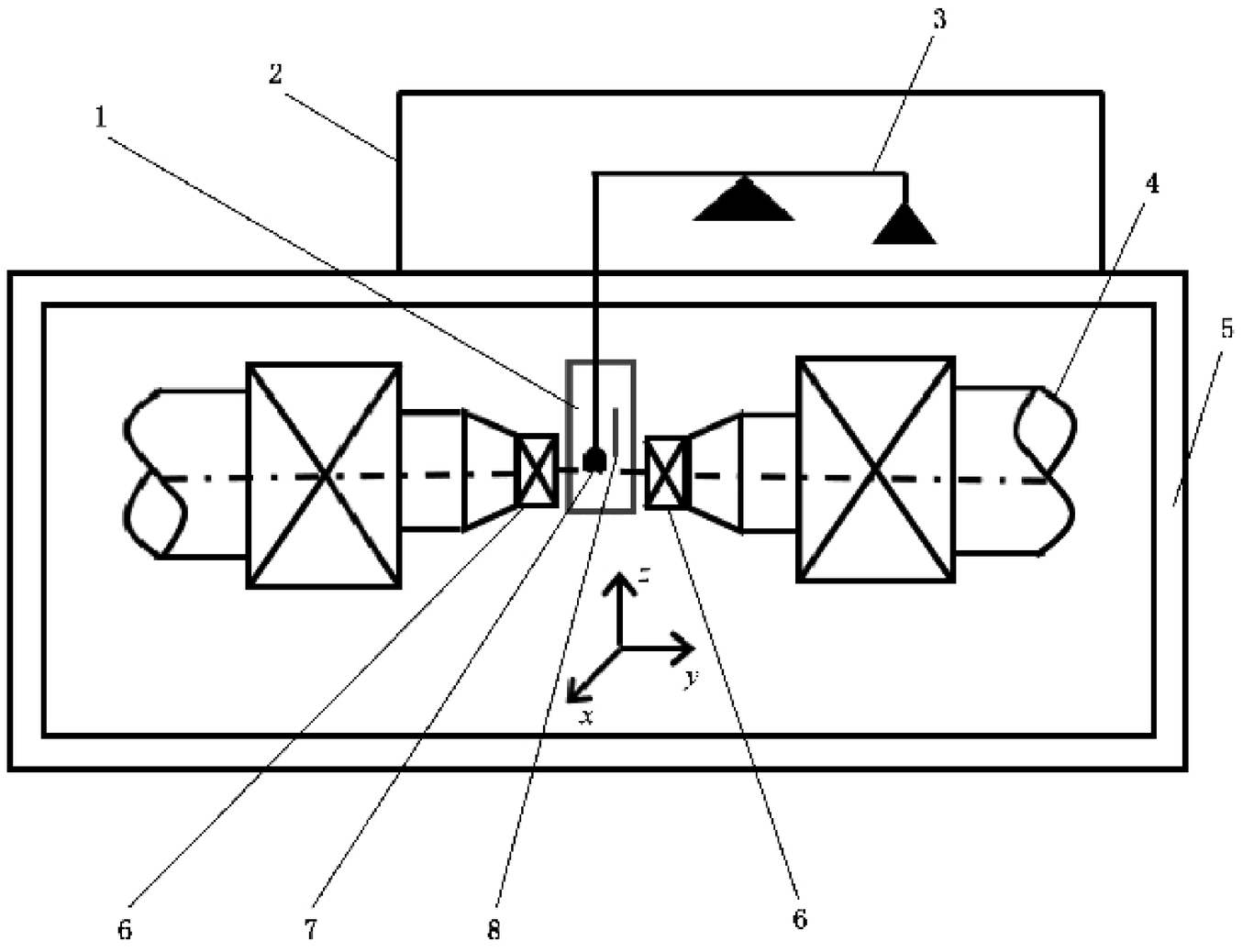
同 5.1.3 e)。

e) 测量支架

用测量支架稳定天平于电磁铁的上方。测量支架应为封闭结构，其高度宜确保天平置于电磁铁上方 800 mm 外，以避免电磁铁产生的杂散磁场影响天平测量。如果天平放置的高度无法满足要求，测量支架应具有磁屏蔽功能。

f) 梯度磁场线圈

产生均匀磁场的电磁铁极头之间加梯度磁场线圈，产生梯度磁场。梯度磁场也可由特殊形状的极头产生。



标引序号说明：

1——样品；
2——防风罩；
3——天平；
4——电磁铁；
5——测量支架；
6——梯度磁场线圈；
7——控温装置；
8——温度传感器。

图 3　磁称法测量装置示意图(磁化装置为电磁铁)

5.2.4　标准样品

同 5.1.4。

5.2.5　测量程序

5.2.5.1　测量环境条件

应在下列环境条件下进行测量：

a)　温度：18 ℃～28 ℃；
b)　相对湿度：20%～80%。

5.2.5.2　预热

测量前，装置在通电的状态下预热至少 30 min。

5.2.5.3　置零

样品在无外加磁场时，此状态为天平零点。

5.2.5.4　定标

将标准样品放在梯度磁场最大位置。用特定磁场下标准样品的磁矩值对仪器进行定标。

注：在标准样品受力方向上调节样品的位置，找出其受力最大的位置，该位置即为梯度磁场最大位置。

5.2.5.5 放置样品

将样品放置在控温装置梯度磁场最大位置(定标时标准样品所在位置)。对于各向异性样品,应使样品的易磁化方向沿外磁场方向;对于易氧化样品,应对控温装置通入惰性气体保护处理。

注:将样品放置在梯度磁场最大位置,旋转样品,磁矩最大的方向即为样品的易磁化方向。

5.2.5.6 测试

同 5.1.5.6。

5.2.6 数据处理

同 5.1.6。

5.3 抽拉法

5.3.1 测量原理

样品磁化后,用校准后的探测线圈与校准后的磁通积分器相连构成的磁通测量系统来测量样品在特定温度下的开路磁通 Φ。样品的磁矩 m 按公式(5)计算得出。

$$m=\frac{\Phi}{\mu_0 k_h} \qquad \cdots\cdots(5)$$

式中:

m ——样品的磁矩,单位为安平方米($A\cdot m^2$);

Φ ——磁通,单位为韦伯(Wb);

μ_0 ——磁常数($\approx 4\pi\times 10^{-7}$ H/m);

k_h ——探测线圈常数(对应单位电流产生的磁场),单位为每米(m^{-1})。

将样品置于控温装置中,通过控制温度变化,能够测量出样品的磁矩 m 随温度 T 的变化曲线(m-T 曲线)。

也可以通过测试磁通随温度的变化曲线来确定居里温度。

5.3.2 样品

样品应能置于探测线圈磁场均匀区和控温装置内,可以不限形状。

5.3.3 测量装置

测量装置主要由样品固定装置、探测线圈、控温装置、磁通积分器等构成,如图 4 所示。具体要求如下。

a) 探测线圈

探测线圈应符合 GB/T 38437—2019 第 6 章的规定。

b) 磁通积分器

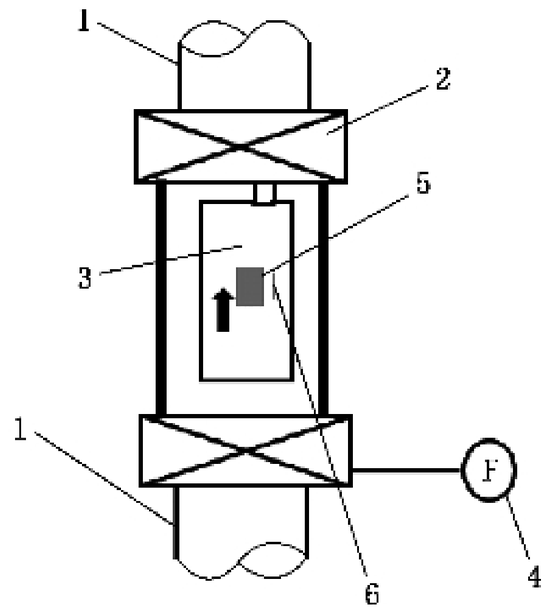
磁通积分器通过样品在探测线圈中抽拉或旋转的过程中产生的感应电压变化,进而测得磁化强度。磁通积分器应定期校准。

c) 控温装置

同 5.1.3 d),应能置于亥姆霍兹线圈内。

d) 温度传感器

同 5.1.3 e)。



标引序号说明：

1——样品固定装置；

2——探测线圈；

3——控温装置；

4——磁通积分器；

5——样品(箭头为样品的抽拉方向)；

6——温度传感器。

图 4　抽拉法测量装置示意图

5.3.4　测量程序

5.3.4.1　测量环境条件

应在下列环境条件下进行测量：

a)　温度：18 ℃～28 ℃；

b)　相对湿度：20%～80%。

5.3.4.2　开机预热

测量前，磁通积分器在通电的状态下预热至少 30 min。

5.3.4.3　置零

在探测线圈中无样品的状态下，将磁通积分器置零。

5.3.4.4　放置样品

样品饱和磁化后(各向异性样品沿其易磁化方向磁化)，放置于控温装置内探测线圈径向与轴向的中心位置。样品的磁化方向与探测线圈的轴向一致。可采用抽拉探测线圈或样品、翻转样品两种方式，抽拉或者翻转过程中样品温度不应发生变化。抽拉后样品与探测线圈之间距离应足够远，以避免磁耦合。

注：将样品放置在探测线圈中心位置后，旋转样品，磁矩最大的方向即为样品的磁化方向。

5.3.4.5　测试

控温装置从室温开始升温至每个温度点，并保温足够的时间，使样品与箱内温度达到热平衡后，采用抽拉探测线圈或样品、翻转样品的方式以产生感应信号，然后读取磁矩数据，并记录控温装置温度。按照此过程升温至最高测量温度，获得 m-T 曲线。

在低于预估居里温度 50 ℃内升温速率应不超过 1 ℃/min。在低于预估居里温度 10 ℃左右时，每

个测量温度点的间隔不超过 1 ℃。

抽拉或者翻转过程中样品温度不应发生变化。抽拉后样品与探测线圈之间距离应足够远，以避免磁耦合。

5.3.5 数据处理

同 5.1.6。

6 结果报告

结果报告至少应包括：

a) 样品信息；

b) 仪器设备信息；

c) 环境条件；

d) 测量方法(所使用的标准编号)；

e) 测量结果。

测量结果应提供 m-T 曲线以及求导后的 $\mathrm{d}m/\mathrm{d}T$ 曲线和居里温度数值，同时应提供确定居里温度的切线、升温速率(居里温度附近)、保温时间和外磁场大小等测试条件信息。

常见永磁材料的居里温度典型值见附录 A。

附 录 A
（资料性）
常见永磁材料的居里温度典型值

参照 GB/T 17951—2022，表 A.1 列出了常见永磁材料的居里温度典型值，供参考。

表 A.1 常见永磁材料的居里温度典型值

序号	材料	居里温度 ℃
1	稀土铁硼	310
2	稀土钴(1∶5)	720
3	稀土钴(2∶17)	820
4	永磁铁氧体	450
5	铝镍钴	750～850
6	铬铁钴	620～640
7	铁钴钒铬	720

参 考 文 献

[1] GB/T 17951—2022 硬磁材料一般技术条件