

中国国际热核聚变实验堆计划采购包专项标准

HJB 1008—2017

磁约束聚变堆用弱磁材料磁导率测量方法

**Test methods for permeability of feebly magnetic materials in magnetic
confinement fusion reactor**

2017 - 01 - 23 发布

2017 - 02 - 23 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 方法 1: 磁通计测量法	1
4 方法 2: 顺磁材料磁导率测量法	4
5 方法 3: Low Mu 弱磁仪测量法	6
附录 A (资料性附录) 方法 1 与 GJB 937—1990 标准的差异	8

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国国际核聚变能源计划执行中心提出并归口。

本标准起草单位：山西太钢不锈钢股份有限公司、核工业西南物理研究院。

本标准主要起草人：刘承志、李鹏远、任永秀、韩石磊、魏海鸿、范小风、孙林煜、张腾。

磁约束聚变堆用弱磁材料磁导率测量方法

1 范围

本标准规定了磁约束聚变堆用弱磁材料磁导率（不高于4.0）的三种测量方法的内容和要求。
本标准规定的三种测量方法的适用范围如下：

- a) 方法1：磁通计测量法，适用于磁约束聚变堆用相对磁导率在1.0和4.0之间的材料的磁导率的测量；
- b) 方法2：顺磁材料磁导率测量法，适用于磁约束聚变堆用相对磁导率小于1.05的弱磁材料的磁导率的测量；
- c) 方法3：Low Mu弱磁仪测量法，适用于磁约束聚变堆用相对磁导率3.0或更低的弱磁材料的磁导率的测量。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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。

GJB 937—1990 弱磁材料磁导率标准检验方法

ASTM A342/A342M 弱磁材料透磁率的试验方法（Standard Test Methods for Permeability of Feeebly Magnetic Materials）

3 方法1：磁通计测量法

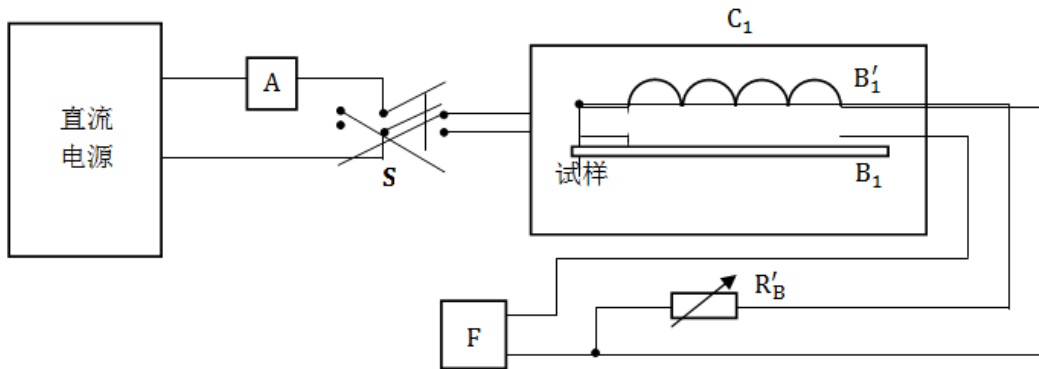
3.1 意义和用途

3.1.1 本方法适用于规范验收、设计、服役评估、管理性法规、制造控制和研究性开发。

3.1.2 本方法一般用于评定零件加工前的半成品。本方法与GJB 937—1990的差异参见附录A。

3.2 装置

3.2.1 方法原理：如图1所示。



- S——电流换向开关；
- A——安培表；
- F——磁通计；
- C₁——磁化螺线管；
- B₁——测量线圈；
- B₁'——补偿线圈；
- R'_B——空气磁通补偿电阻。

图1 方法1原理图

3.2.2 电源：图1所示直流电源应优先选用电子学电源，也可使用蓄电池。

3.2.3 测量装置：装置由带有测量线圈（位于螺线管中段，用于测量磁感应强度）的磁化螺线管、磁通计、空气磁通补偿电阻组成，并满足下列要求：

- a) 磁化螺线管 C₁：最小长度 300mm，其长度与等效直径之比大于或等于 4。磁化绕组应均匀缠绕，且在无过热情况下，沿试样长度方向产生至少 3000 e[24 KA/m]均匀磁场；
- b) 测量线圈 B₁：用于测量感应强度，截面积不大于试样截面积的 10 倍。测量线圈应有足够的匝数(>1000)以提供适当分辨率，且长度应不大于试样长度的 20%；
- c) 补偿线圈 B₁'：长度、截面积和匝数同 B₁，且反向与它串联；
- d) 空气磁通补偿电阻 R'_B：与图1中补偿线圈配合使用，用于补偿测量线圈 B₁的空气磁通，以便直接测量磁感应强度；
- e) 电子磁通计 F：用于测量磁感应强度。另一种方法是，磁化装置可连接到一个直流磁滞曲线记录仪；
- f) 磁场强度传感器（可选）：若磁场强度不能通过磁化电流准确测定，则应使用霍尔效应传感器或 H 型线圈连接于磁通计。

3.3 试样

3.3.1 试样的种类有棒材、圆钢、线材或截面均匀的带钢。必要时可使用同一批的多个试样来增加试样横截面积。试样的横截面积应不小于 20mm²。长度不小于 100mm，且长度与直径或等效直径（即等于试样截面积的圆的直径）之比应满足表1的要求：

表1 长度与直径或有效直径之比

序号	相对磁导率	尺寸比（长度与直径或等效直径之比）
1	1.5 以下	10 或更大
2	1.5 到 2.0	15 或更大
3	2.0 到 4.0	30 或更大

3.3.2 用于质量控制与类似试样做比较时，本方法可采用尺寸比（长度与直径或等效直径之比）较小的试样。

3.4 步骤

3.4.1 测量试样厚度和宽度或直径，并计算截面积。

3.4.2 往螺线管中插入试样前，达到精确平衡，通过将试验中使用的最大磁化电流反向消除线圈 B_1 空气磁通量的影响，并调节补偿电阻使磁通感应线圈输出达到最小。

3.4.3 将试样放入线圈 B_1 中的正确位置，将磁场强度调节到所需的试验值，然后将磁化电流反向并记录磁通计数。另一种方法是输入记录磁滞曲线记录仪，绘出 B 与 H 曲线。

3.5 结果计算

3.5.1 磁导率的计算

将磁通计读数转化为磁感应强度 B_1 并按公式 (1) 计算磁导率：

$$\mu = 1 + \frac{B_1}{H} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

μ ——试样磁导率的数值，单位为亨利每米(H/m)；

B_1 ——试样磁感应强度的数值，单位为高斯(Gs)；

H ——磁场强度的数值，单位为奥斯特(Oe)。

3.5.2 相对磁导率的计算

将磁通计读数转化为为磁化强度 J ，并按公式 (2) 计算相对磁导率：

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{4\pi \cdot 10^{-3} \Gamma_m H} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

μ_r ——试样相对磁导率，无量纲；

J ——磁极化强度的数值，单位为特斯拉(T)；

Γ_m ——真空磁导率的数值： $4\pi \times 10^{-7}$ ，单位为亨利每米(H/m)；

H ——磁场强度的数值，单位为奥斯特(Oe)。

3.6 精度和偏差

3.6.1 本方法的精度和偏差不由实验室间研究制定。

3.6.2 由于试样尺寸比引起的退磁场，测量的磁导率可能低于其真实值。这将导致过高估计磁场强度，而且会减小 B 线圈磁通量。如果试样和线圈尺寸比符合 3.3.1 和 3.2.3 中 b) 的规定，由于退磁场效应， $(\mu - 1)$ 最大负误差在 $(\mu - 1) < 0.5$ 时为 -3%。

4 方法 2：顺磁材料磁导率测量法

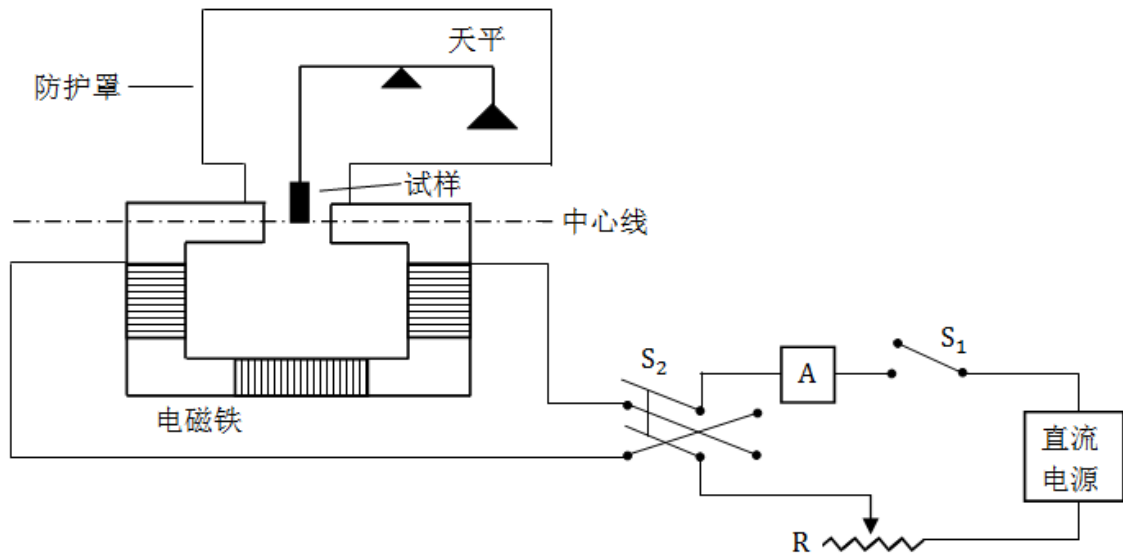
4.1 意义和用途

4.1.1 本方法适用于规范验收、设计、服役评估、管理性法规、制造控制和研究性开发。

4.1.2 本方法用于部件预制前对半成品的评估。

4.2 装置

4.2.1 方法原理：如图 2 所示。



- A——安培表；
- S₁——电流换向开关；
- S₂——电流换向开关；
- R——变阻器。

图2 方法 2 原理图

4.2.2 电源：稳定的直流电源，如蓄电池或适当的直流稳压电源。

4.2.3 磁导计：如图 2 所示的磁导计，包括符合下列要求的天平和电磁铁：

- a) 电磁铁：电磁铁磁极面的水平尺寸为 38 mm，垂直尺寸为 19 mm。磁极面间的距离为 19 mm。磁化绕组应在无过热加热的情况下磁极间能够产生至少 1000 Oe [80 kA/m] 的磁场强度；
- b) 天平：量程为 50 g，精度为 0.1 mg。天平中的磁性材料应在电磁铁上方 127 mm 或更高。试样周围空间应用非磁性材料防护罩封闭，以防止试样在测量中受气流的影响；
- c) 其它电流控制设备：磁化回路中的电流表，变阻器及换向开关。

4.3 试样

试样的种类有棒材,圆钢,线材,带钢或截面均匀的管材。试样长应不小于66mm且宽应大于12.7mm。最小横截面积应不小于13mm²。

4.4 步骤

4.4.1 测量试样厚度和宽度或直径,并计算截面积。

4.4.2 将试样从天平上悬挂起来,使其下端在气隙中心线的±1.6mm(图2)以内,且在磁化电流切断时称量。

4.4.3 接通磁化电流,并将它设定到可以沿气隙中心线产生5000e[40kA/m]磁场强度的值。电流至少换向五次以消除电磁铁芯部的磁滞效应。然后切断电流称量试样。

注:沿气隙中心线磁场强度应使用参考标准确定,如已知导磁系数的氯化镍饱和溶液,或标准线圈及磁通计。若使用线圈,它的最大直径不能超过3.2mm,且用磁化电流换向的方式测量磁场时它的轴线应在气隙中心线上。

4.4.4 重复4.4.3规定的步骤,将磁化电流调节至沿气隙中心线产生10000e[80kA/m]磁场强度的值。

4.5 结果计算

4.5.1 磁导率

应按公式(3)或公式(4)计算磁导率:

$$\mu = 1 + \frac{8\pi}{AH^2} \dots\dots\dots (3)$$

或:

$$\mu = 1 + \frac{24.65\Delta_m}{AH^2} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- μ ——试样的磁导率,单位为亨利每米(H/m);
- A ——试样的横截面积,单位为平方毫米(mm²);
- H ——称量时沿气隙中心线磁场强度,单位为奥斯特(Oe);
- Δ_m ——质量表面变化,单位为毫克(mg)。

4.5.2 相对磁导率的测量

应按公式(5)或公式(6)计算相对磁导率:

$$\mu_r = 1 + \frac{2F}{16\pi^2 \cdot 10^{-6} \Gamma_m AH^2} \dots\dots\dots (5)$$

或:

$$\mu_r = 1 + \frac{1.56 \times 10^7 \Delta_m}{16\pi^2 \cdot 10^{-6} \Gamma_m AH^2} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- μ_r ——试样相对磁导率,无量纲;
- F ——由磁场造成的施加于试样上的力,单位为牛顿(N);
- A ——试样的横截面积,单位为平方毫米(mm²);
- H ——称量时沿气隙中心线磁场强度,单位为奥斯特(Oe)。

4.6 精度及偏差

4.6.1 本方法的精度和偏差不由实验间研究制定。对沿长度方向磁性均匀的试样，在一定温度下测量，认为 $(\mu-1)$ 应在 $\pm 8\%$ 或 ± 0.0001 内，取最大值为可信的。

4.6.2 若按照 4.4.3 和 4.4.4 规定测得的磁导率不在 4.6.1 的测量误差内，则本方法不适用。

5 方法 3: Low Mu 弱磁仪测量法

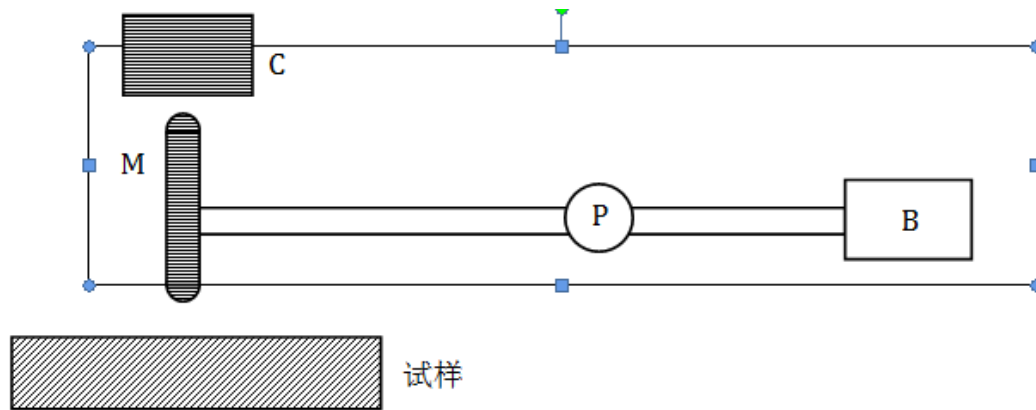
5.1 意义和用途

5.1.1 试样如果有合适的平面，该仪器不受形状限制，均可测量，包括零部件。

5.1.2 此方法的测试结果的表达，通常为“磁导率低于”，本方法适用于定性验收之用。

5.2 装置

5.2.1 Low Mu 弱磁仪：基于永磁棒与一个已知磁导率的标准样和被测材料的相互吸引原理进行定性测量，测量原理如图 3 所示。



- B——平衡块；
- C——校准样品；
- P——支点；
- M——永磁指示器。

图3 Low Mu 弱磁仪原理图

5.2.2 永磁棒：永磁棒中心贴在移动臂末端，移动臂支点在中心，另一端有一个平衡块，使永磁棒在一个平面上的两个方向移动。

5.2.3 标准试样：由已知磁导率的弱磁材料制成，并由仪器制造商照制定的标准制进行标定。

5.3 试样

测试的试样和或材料的面积不小于 100mm^2 ，厚度不小于 3mm （试样可以多层复合）。体积超出上述最小值的试样可以是任何形态，外形或状态（如铸造件、锻件、棒材、焊珠等）。如果被测试样表面可与永磁棒完全接触，指示器可放在试样任意位置。

5.4 步骤

5.4.1 将已知磁导率的校准样品用螺丝插入外壳上部。

5.4.2 永磁棒靠近插入的标准样品并贴合。

5.4.3 永磁铁从指示器底部的孔伸出，其末端与测试材料接触。此时将仪器向上移动，若试验材料磁导率高于标准样品的磁导率，永磁棒会首先与标准样品分离。若试验材料磁导率低于标准样品的磁导率，永磁棒会首先与测试样品分离。

5.4.4 通过变换插入的标准样品，可将测试材料的磁导率定性测量。

5.5 精度和偏差

5.5.1 指示器带有的标准样品，其相对导磁导率分别为 1.01 μ _u、1.02 μ _u、1.05 μ _u、1.10 μ _u、1.15 μ _u、1.2 μ _u、1.4 μ _u、1.6 μ _u、1.8 μ _u、2.0 μ _u、2.5 μ _u、3.0 μ _u（校准样品的偏差在±5%以内）。

5.5.2 Low μ 弱磁仪制造商校准样品的磁导率。校准样品按照 ASTM A341/A341M 来进行标定。测量值为在 25℃下磁场 100 Oe 时所测得的值。



附录 A
(资料性附录)

方法 1 与 GJB 937-1990 标准的差异

具体差异见表 A.1。

表 A.1 方法 1 与 GJB 937—1990 标准的差异

不同点	GJB 937—1990	方法 1
测量手段	冲击检流计	磁通计
测量公式	$\mu_r = 1 + \frac{K_B(a_2 - a_1)J}{2\mu_0 KINA}$ $K_B = \frac{2MI_K}{a_K}$ <p>式中： K_B——冲击常数，单位为韦伯每毫米(wb/mm)； J——磁极化强度的数值，单位为特斯拉(T)； M——标准互感值，单位为亨利(H)； I_K——校正电流，单位为安培(A)； a_K——冲击检流计偏转，单位为毫米(mm)； μ_r——试样的相对磁导率，无量纲； a_1——磁通补偿存有残差引起检流计偏转，单位为毫米(mm)； a_2——测量线圈放入试样检流计偏转，单位为毫米(mm)； μ_0——真空磁导率的数值：$4\pi \times 10^{-7}$，单位为亨利每米(H/m)； K——磁化螺线管常数，单位为每米(m⁻¹)； I——磁化电流，单位为安培(A)； N——测量线圈匝数，无量纲； A——试样的横截面积，单位为平方米(mm²)。</p>	$\mu_r = 1 + \frac{J}{\Gamma_m H}$ <p>式中： μ_r——试样的相对磁导率，无量纲； J——磁极化强度的数值，单位为特斯拉(T)； Γ_m——真空磁导率的数值$4\pi \times 10^{-7}$，单位为亨利每米(H/m)； H——磁场强度的数值，单位为安培每米(A/m)。</p>
长度与直径或有效直径之比	<p>当相对磁导率(μ_r)小于 1.1 时，尺寸比大于等于 10；</p> <p>当 μ_r 在 1.1~2.0 时，尺寸比大于等于 20；</p> <p>当 μ_r 在 2.0~4.0 时，尺寸比大于等于 30。</p>	<p>当 μ_r 小于 1.5 时，尺寸比大于等于 10；</p> <p>当 μ_r 在 1.5~2.0 时，尺寸比大于等于 15；</p> <p>当 μ_r 在 2.0~4.0 时，尺寸比大于 30。</p>

表 A.1 (续)

不同点	GJB 937—1990	方法 1
测量线圈	至少 2000 匝, 长度不大于 25 mm。	大于 1000 匝, 长度不大于试样的 20%。
不确定度	在 2% 范围内。	($\mu-1$) 最大负偏差-3%。

