

# 中华人民共和国国家标准

## 单片电工钢片(带)磁性能测量方法

GB/T 13789—92

Magnetic sheet and strip—Methods of measurement  
of magnetic properties by means of  
a single sheet tester

本标准等效采用国际电工委员会标准 IEC 404-3《单片电工钢片(带)磁性能测量方法》。

### 1 主题内容与适用范围

本标准规定了用单片磁导计测量电工钢片(带)的比总损耗、比视在功率和交流磁化曲线的方法。

本标准规定电工钢片(带)的交流磁性能参数都是在磁通波形正弦条件下测得的,适用的磁极化强度范围为:冷轧取向电工钢片(带)1.0~1.8T,冷轧无取向和热轧电工钢片 0.8~1.5T,如果磁通正弦条件得到保证此范围可相应展宽。

本标准规定测量时环境温度为  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ ,相对湿度小于 80%。

本标准适用于冷轧取向、无取向和热轧电工钢片(带)的交流磁性能测量,频率范围为 45~65 Hz。

本标准 and GB 3655 规定的测量方法得到等同的测量结果。在两种测量方法并行的期间,两种测量方法得到的测量结果具有同等的效力。

### 2 引用标准

GB 3655 电工钢片(带)磁、电物理性能测量方法

### 3 磁导计

#### 3.1 磁轭的结构和尺寸

本标准 and GB 3655 的主要区别就是以磁导计取代爱泼斯坦方圈作为励磁机构。该磁导计由上下对称的两个 U 型磁轭组成。制造磁轭的材料用冷轧取向硅钢,它应有低的磁阻,且在频率为 50 Hz,磁极化强度为 1.5T 时比总损耗低于 1.0 W/kg。

为了减小磁轭内部涡流的影响,使其内部磁通分布有较好的均匀性,磁轭要用条片叠层方式做成,在转角处搭接(见图 1)。

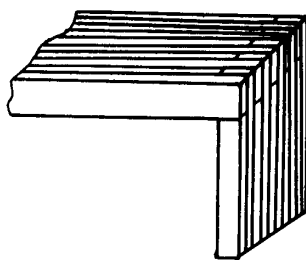


图 1 磁轭叠片方式

磁轭结构基本规定:

磁轭极面宽度:  $25 \pm 1$  mm。

每个磁轭的两极面高低相差小于 0.5 mm, 上下极面闭合时, 上下极面间的最大缝隙不大于 0.005 mm。

磁轭高度  $h_y$  为 90~150 mm, 宽度  $W_y$  为  $500^{+5}_0$  mm, 长度  $l_y$  为  $500_{-0}^0$  mm, 内侧长度  $(l_y - 2d_y)$  为  $450 \pm 1$  mm。

磁轭应结构牢固保持刚性和良好的稳定性, 其中一个可上下平动, 以便取出和装入试样, 磁路闭合时保持加在试样上的压力为 100~200 N。

为了测量各种不同规格尺寸的产品, 可以参照上述的各项要求, 制造不同尺寸的磁导计。比如尺寸规格为 1 000 mm×1 000 mm 的磁导计。设计和制造这些不同尺寸的磁导计时除磁轭的长度, 高度和宽度外均应遵照 3.1, 3.2 中各项规定, 以保证获得和 500 mm×500 mm 规格的磁导计同等的测量结果不确定度。

### 3.2 磁轭的损耗曲线

磁轭在制作完毕后应测量其损耗, 以便用于比总损耗测量结果的计算。磁轭中在实际工作时的磁感应强度范围为 10~40 mT, 测量时在磁轭上绕励磁绕组和感应绕组各 25 匝, 闭合磁路。仿照空载变压器损耗测量方式测量磁极化强度为 10~40 mT 范围内的磁轭损耗, 并制成  $P_y(J_y)$  关系曲线或表格。

### 3.3 线圈

在 U 型磁轭的中间安装初级(励磁)和次级(感应)线圈, 它应绕制在一个无磁性、绝缘性良好的矩形线圈骨架上, 并保证在长期使用中不发生形变。

对于一个 500 mm×500 mm 的磁导计, 线圈长度应不小于 400 mm。线圈骨架的基本尺寸如下(见图 2):

$l_1$ :  $445 \pm 2$  mm;

$W_1$ :  $510 \pm 1$  mm;

$h_1$ :  $5_{-2}^0$  mm;

$h_2$ :  $\leq 15$  mm。

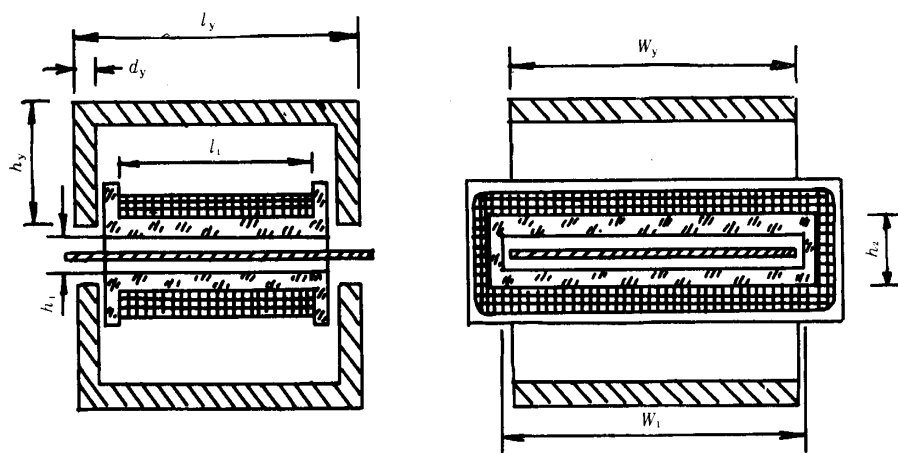


图 2 磁导计结构图

线圈绕制方法:

初级绕组匝数应根据励磁电源的输出电压确定并绕在次级线圈外层, 对于 500 mm×500 mm 磁导计, 可用直径为 1 mm 的漆包线, 一层绕 400 匝, 共绕 5 层, 并将 5 个绕组并联组成初级线圈。为减少初次级线圈之间的漏电, 次级线圈匝数应等于初级线圈匝数, 并在电路连接时保持两个线圈之间的等电位

状态,磁导计次级线圈用 1 mm 漆包线在线圈骨架里层均匀地绕一层,400 匝。

### 3.4 空气磁通补偿

用一空心互感进行次级线圈中的空气磁通补偿,互感的初级和磁导计的初级线圈串联,互感的次级和磁导计的次级线圈反向串联。

互感的大小应根据磁导计的结构计算,并用实验方法进行调整。调整时线圈中不放试样,闭合磁轭,通以 1A 左右的励磁电流,调整互感次级匝数使得次级回路感应电压小于次级线圈上感应电压的 0.1%。

## 4 试样

试样尺寸应根据磁导计的尺寸选取,其长度不得小于磁轭外侧之间的距离。虽然磁轭外的试样部分对测量结果影响甚小,但也不应过长以免影响试样的放入、移动和定位。

试样的宽度应尽可能接近磁轭的宽度,为了保证测量准确度,试样宽度应不小于磁轭宽度的 60%。

试样的宽度应尽可能接近磁轭的宽度,为了保证测量准确度,试样宽度应不小于磁轭宽度的 60%。

试样要求剪切整齐、平坦,直角性良好,边沿无明显毛刺。试样应按产品标准要求,平行或垂直轧制方向剪切,以钢片(带)长边为准,其允许角度偏差为:

冷轧取向电工钢片(带): $\pm 1^\circ$ ;

冷轧无取向和热轧电工钢片(带): $\pm 5^\circ$ 。

对于冷轧无取向和热轧电工钢片(带),要求测量平行和垂直轧制方向的磁性能并取其平均结果作为磁性能参数,为此试样必须按磁轭外侧之间的距离切成正方形。边长误差 $\pm 0.1\%$ 。

## 5 取样

取样应按产品标准的规定进行,样张应对该被检批量产品的磁性能具有充分的代表性,样张选定后推荐的试样剪切方式见图 3。

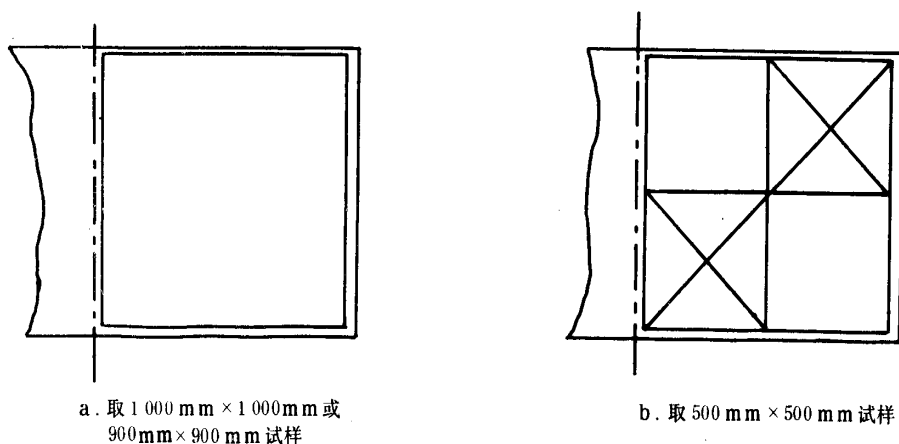


图 3 试样的剪取

## 6 测量装置

### 6.1 基本原理

测量装置的基本原理见图 4。

试样放入磁导计后闭合磁路,励磁电源调到规定的频率(比如 50 Hz),逐渐增大励磁电流,直到设定的工作点,测量  $M_1$  次级电压的平均值可以计算出励磁场峰值:

$$\dot{H} = \frac{N_1 \dot{I}_1}{l_m} = \frac{N_1 \bar{U}_m}{4l_m f M} \dots\dots\dots(1)$$

式中： $\dot{H}$ ——磁场强度峰值，A/m；  
 $\bar{U}_m$ ——互感次级感应电压平均值，V；  
 $\dot{I}_1$ ——励磁电流峰值，A；  
 $l_m$ ——等效磁路长度，m；  
 $f$ ——测试频率，Hz；  
 $M$ ——互感值，H。

测量  $N_2$  上的感应电压平均值可以计算出试样中的磁极化强度峰值：

$$j = \frac{\bar{U}_2}{4f N_2 A} \dots\dots\dots(2)$$

式中： $j$ ——磁极化强度峰值，T；  
 $\bar{U}_2$ ——次级感应电压平均值，V；  
 $A$ ——试样的横切面积， $m^2$ 。  
 由此可以得到基本磁化曲线。

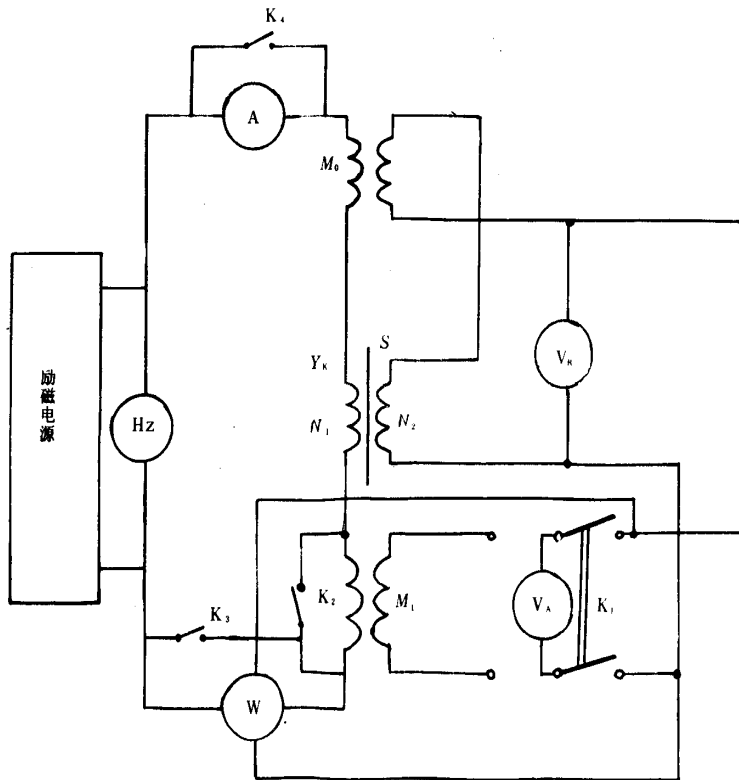


图 4 测量装置原理图

Hz—频率表； Vr—有效值电压表； Va—平均值电压表； W—功率表； A—有效值电流表；  
 $M_0$ —空气补偿互感； $Y_k$ —磁导计； $N_1$ —励磁线圈； $N_2$ —感应线圈； $M_1$ —测量磁场用的标准互感；  
 $S$ —被测试样； $K_1, K_2, K_3, K_4$ —开关

用功率表测量损耗，减去仪表损耗和磁轭损耗便可得试样的损耗，除以试样的有效质量便可得到比总损耗：

$$P_s = \left( P_w \frac{N_1}{N_2} - P_y - \frac{\tilde{U}_2^2}{R_i} \right) / m_e \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中： $P_s$ ——比总损耗，W/kg；

$P_w$ ——功率表测量结果，W；

$P_y$ ——磁轭的损耗，W；

$\tilde{U}_2$ ——次级感应电压有效值，V；

$R_i$ ——次级回路中仪器的总的输入电阻， $\Omega$ ；

$m_e$ ——试样的有效质量，kg。

试样的有效质量可用公式(4)确定：

$$m_e = m \frac{l_m}{l_s} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中： $m$ ——试样的总质量，kg；

$l_s$ ——试样的长度，m。

通过测量  $N_2$  上感应电压的有效值和励磁电流的有效值相乘，得试样的视在功率和比视在功率，测量电流的有效值除用图中所示的有效值电流表外，还可以用一个精密取样电阻，用有效值电压表测量取样电阻上的电压有效值来得到。

试样在测量前必须退磁，这可以通过励磁电源把电流升到试样中的励磁场达到 5 000 A/m 或者更大一点以后逐渐平稳地把电流降到零来实现。

## 6.2 励磁电源

励磁电源要求具有低输出阻抗，足够的功率容量，高的电压，频率稳定度，在测量过程中频率和电压的变化都必须小于 0.1%。

为了保证磁通正弦条件，必须保持  $N_2$  上的感应电压为正弦波，最好是保证这个感应电压的波形系数在 1.111±0.01 以内，这一要求可以用一个电子反馈放大器来实现。

电源的容量至少要大于试样的视在功率，对于 500 mm×500 mm 的磁导计电源的容量要求大于 250 VA。对于 1 000 mm×1 000 mm 磁导计电源的容量要求大于 1 000 VA。

## 6.3 平均值电压表

由于次级感应电压平均值测量在比总损耗测量中的重要性，装置中所用的平均值电压表准确度等级应尽可能高，其优选的仪器是准确度等级为 0.2% 的数字电压表，为保证尽可能小的次级负载，其输入电阻应不小于 1 000  $\Omega$ /V。

可以使用符合准确度和输入电阻要求的作为测量装置输入级的运算放大器。

## 6.4 有效值电压表

准确度等级 0.5 级或者更好。

## 6.5 有效值电流表

低内阻，准确度等级 1 级，用来测量励磁电流有效值，监视比总损耗测量时功率表电流支路不要过载。

## 6.6 频率表

准确度等级 0.1 级或者更好。

## 6.7 功率表

功率测量要求一个高灵敏度的低功率因数 ( $\cos\Phi=0.1\sim0.2$ ) 功率表，其准确度等级为 0.5 级或者

更好。

它的电压支路电阻应不小于 200 Ω/V,并且总的电阻大于电抗 5 000 倍。

## 7 测量

### 7.1 测量顺序

本标准规定任何磁性能参数的测量都应遵循由退磁状态开始,从低磁极化强度到高磁极化强度,从低频到高频的测量顺序。当所选择的测试点对应的磁极化强度或频率低于前一个测试点时,则应重新退磁。

### 7.2 测量前的准备

测量试样长度,误差小于 0.1%;测量试样质量,误差小于 0.1%;将试样置入磁导计,调准试样位置后闭合磁路。测量前试样应退磁,退磁场应缓慢降低到零。

### 7.3 比总损耗和比视在功率测量

#### 7.3.1 电源调节

调节电源输出使次级感应电压平均值为:

$$\bar{U}_2 = 4fN_2 \frac{R_1}{R_1 + R_t} A j \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:  $R_t$ ——次级线圈  $N_2$  和空气磁通补偿互感的次级总的串联电阻,Ω。

试样的截面积由下式给出:

$$A = \frac{m}{l_s \rho_m} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:  $\rho_m$ ——试样的密度,kg/m<sup>3</sup>。

通常情况下,平均值电压表指示值乘了常数 1.111,计算时等式中  $\bar{U}_2$  的另一边也应乘以 1.111 即与该表的示值对应。

试样的密度由生产厂按相应的产品标准提供。

#### 7.3.2 读数

测量比总损耗时,开起  $K_4$ ,闭合  $K_2, K_3, K_1$  掷向 cd,调整频率,使之偏差小于 0.1%。逐步增大励磁电流,使平均值电压表的指示按式(5)计算出的设定值,读取有效值电流表读数,根据该读数选择并调整好功率表电流量程,随后闭合  $K_4$ ,开启  $K_3$ ,微调励磁电流,使平均值电压表指示到设定值,随后读取功率表和有效值电压表读数。

测量比视在功率时,闭合  $K_2, K_3$ ,开启  $K_4, K_1$  掷向 cd,调节励磁电流,使平均值电表指示到设定值,然后独取电流表和有效值电压表读数。

#### 7.3.3 比总损耗计算

首先,计算试样的总损耗

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_w - \frac{\bar{U}_2^2}{R_t} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:  $P_w$ ——功率表测量结果,W。

式中  $\bar{U}_2$  在符合本标准规定的磁通波形正弦条件,即波形系数  $F = 1.111 \pm 0.01$  时,可以  $1.111 \times \bar{U}_2$  代

替。磁轭损耗对测量结果的影响计入等效磁路长度中,故在式(7)中没有这一项。

试样的比总损耗  $P_s$  为:

$$P_s = P_c \frac{l_s}{ml_m} \dots\dots\dots (8)$$

式中:  $P_c$ ——为按式(4)计算出来的总损耗, W;

$l_m$ ——等效磁路长度, m。

7.3.4 波形因数修正

测量时应保持磁通即次级感应电压波形正弦,在特殊情况下,当波形系数(次级感应电压有效值与平均值的比)偏离 1.111 且不超过  $\pm 0.05$  时,应当引入波形因数修正。

用式(6)可以得到精确的已修正过的比总损耗值:

$$P_s' = \frac{P_s}{\frac{P_h}{P_s} + \left(\frac{P_p}{P_s}\right) \left(\frac{F}{1.111}\right)^2} \dots\dots\dots (9)$$

用下面近似公式也可以得到足够准确的结果:

$$\Delta P_s = 2e \left(\frac{\Delta F}{1.111}\right) P_s \dots\dots\dots (10)$$

计入波形失真修正量时的比总损耗  $P_s'$  为:

$$P_s' = P_s - \Delta P_s = \left[1 - 2e \left(\frac{\Delta F}{1.111}\right)\right] P_s \dots\dots\dots (11)$$

- 式中:
- $\Delta P_s$ ——波形失真修正量, W/kg;
  - $P_s$ ——按(8)式求得的试样的比总损耗, W/kg;
  - $P_s'$ ——考虑波形修正后的比总损耗, W/kg;
  - $e = P_p/P_s$ ——涡流在比总损耗中占的比例;
  - $(1-e) = \frac{P_h}{P_s}$ ——磁滞损耗在比总损耗中占的比例;

$\Delta F = \left(\frac{\bar{U}_2}{\bar{U}_2} - 1.111\right)$ ——波形失真系数,其中  $\bar{U}_2$  和  $\bar{U}_2$  为次级感应电压的有效值和平均值。

式(10)中的系数  $e$  通常用改变频率的方法进行测量。测量时频率改变量不能太小,但也不应超出测量点频率的一半或二倍。一般情况下在频率为 50~60 Hz 时可以使用表 1 和表 2 所示的值。

表 1 冷轧电工钢片(带)的系数  $e$  的数值

材 料	测 量 方 式	厚 度, mm			
		0.30	0.35	0.50	0.70
		$e$			
无取向	横纵向平均	—	0.20	0.30	0.40
	全纵向	—	0.25	0.35	0.45
取向	全纵向	0.50	0.60	—	—

表 2 热轧电工钢片(带)的系数  $e$  的数值

硅 含 量, %	测 量 方 式	厚 度, mm		
		0.35	0.50	1.00
		$e$		
0.80~1.80	横纵向平均	—	0.20	0.50
1.81~2.80				—
2.81~3.80		0.20	—	
3.81~4.50		0.30		
		0.20	0.35	

比总损耗的最终结果应保留三位有效数字。

7.3.5 比视在功率计算

试样的比视在功率由下式计算:

$$S_s = I_1 \times \bar{U}_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \left( \frac{l_s}{ml_m} \right) \dots\dots\dots (12)$$

式中:  $I_1$ ——初级电流有效值, A。

7.4 交流磁化曲线测量

7.4.1 电源调节

闭合  $K_4, K_3$ , 先将  $K_1$  掷向 ab, 使平均值电压表接到  $M_1$  次级, 调节电源输出使  $M_1$  次输出电压平均值为:

$$U_m = 4fM \left( \frac{l_m}{N_1} \right) \left( \frac{R_v}{R_v + R_m} \right) \hat{H} \dots\dots\dots (13)$$

式中:  $R_v$ ——平均值电压表输入电阻,  $\Omega$ ;

$R_m$ —— $M_1$  的次级电阻,  $\Omega$ 。

如果平均值电压表的示值已乘以 1.111, 则式(13)的右边也应乘以 1.111 即与该表的示值对应。



7.4.2 读数

当调节励磁电流使平均值电压表的示值达到按式(13)计算出的设定值时,将  $K_1$  掷向 cd,读取平均值电压表的读数。

7.4.3 磁极化强度和磁感应强度的计算:

峰值磁极化强度用下式计算:

$$j = \frac{R_1 + R_2 \bar{U}_2}{R_2 4f N_2 A} \dots\dots\dots (14)$$

$$\hat{B} = \hat{j} + \mu_0 \hat{H} \dots\dots\dots (15)$$

式中:  $\hat{B}$ ——磁感应强度峰值, T;

$\mu_0$ ——真空磁导率,  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m;

$\hat{H}$ ——该测试点对应的磁场强度峰值, A/m。

如果平均值电压表示值乘了系数 1.111,在计算时应除以 1.111 得到次级感应电压平均值。

8 等效磁路长度

尽管使用本装置规定的方法可以得到更接近于定义的测量结果,但为了保持连续性,本标准规定使用一个特定的等效磁路长度,使得单片测量方法可以得到和爱泼斯坦方圈法同样的测量结果。这个特定的等效磁路长度用以下路径求得,先对某一型号的材料制取一片单片试样,并在单片测量装置上进行测量,得到总损耗测量结果。然后将这一片或多片试样按 GB 3655 规定的等概率取样方式取作一付或多付爱泼斯坦方圈试样(如果是冷轧取向硅钢还要按材料标准进行热处理),然后将这一付或多付试样用爱泼斯坦方圈法进行测量,即可获得对于该材料在该单片测量装置中测量时的等效磁路长度  $l_m$ :

$$l_m = \frac{P_c l_s}{m P_s} \dots\dots\dots (16)$$

式中:  $P_c$ ——单片测量装置测得的总的损耗, W;

$P_s$ ——用方圈法测出的该单片试样的比总损耗平均值, W/kg。

为了提高  $l_m$  测量的准确度,至少应取三片单片试样,重复上述试验,取测量结果的平均值。

9 装置的检定

为了确保电工钢片(带)的磁性参数测量结果的准确度和可比性,在实行本标准的同时,需要有确实的计量保证。

9.1 检定

新出厂的,修理后重新使用的单片硅钢磁性测量装置必须经计量部门检定合格后方可使用。

9.2 标准样品

由计量部门制作和发放标准样品,用以检定和校准使用中的测量装置。

10 测量结果的不确定度

本标准采用不确定度(以标准误差表示)表示符合本标准的测量装置在本标准限定的条件下测量结果的不确定程度。

使用符合本标准的测量装置,并在获得上述确实的计量保证以后,比总损耗测量结果的不确定度为(1~1.5)%,磁极化强度为1%,磁场强度和比视在功率为(2~3)%。

---

**附加说明:**

本标准由中华人民共和国冶金工业部提出。

本标准由中国计量科学研究院、冶金部钢铁研究总院和河南省安阳钢铁公司负责起草。

本标准主要起草人瞿清昌、吕包苓、刘京训。

本标准水平等级标记 GB/T 13789—92 Y