

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-8192.2016045

软磁材料基本磁滞回线测量方法与测量装置的研究

朱永红¹, 虞志书², 向礼雄¹, 扶春燕¹, 瞿清昌³

(1. 湖南省永逸科技有限公司, 湖南 娄底 417000;

2. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310013; 3. 中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 目前国内外测试设备供应商和国内相关磁性材料检验机构, 大都采用软件控制的扫描法测量磁滞回线, 在测试矫顽力较高的材料磁滞回线及相关磁特性参数上有一定的参考意义, 但对于低矫顽力高磁导软磁材料, 测试数据的不确定度和重复性则难以满足要求。为了使测量结果具有唯一性, 本文参照基本磁化曲线的定义提出软磁材料的基本磁滞回线这一概念, 并通过对测试方法和配套测试硬件的研究, 即通过软件控制方法的优化, 微机获得自适应冲击(激励)波形函数, 并对采样数据进行自我比较判断, 最终获得了代表材料直流磁性能唯一性的基本磁滞回线。该方法适用于低矫顽力(小于 100 A/m)软磁材料的磁测量, 为推动软磁材料静态磁性能测试技术的发展, 促进标准的完善有一定的作用。

关键词: 软磁材料; 直流磁特性; 磁测量; 磁场扫描法; 基本磁滞回线; 模拟冲击法

文献标志码: A **文章编号:** 1005-8192(2016)05-0000-00

Soft magnetic materials research basic hysteresis loop measurement methods and measuring apparatus

ZHU Yong-hong¹, YU Zhi-shu², XIANG Li-xiong¹,
FU Chun-yan¹, QU Qing-chang³

(1. Hunan Forever Elegance Technology, 417000, Loudi, China;

2. Zhejiang Province Institute of Metrology, 310013, Hangzhou, China;

3. National Institute of Metrology, 100029, Beijing, China)

Abstract: Measuring the magnetic properties of soft magnetic material parameters are the key to ensuring the quality of the device, guiding the research and development of new magnetic materials. Conventional ballistic galvanometer method are defined in the relevant international and national standards, but the use of mechanical switches and ballistic galvanometer may bring non-transient error, and it requires the experienced and professional staff to do the measurement, while measurement process is of low efficiency. Traditional method is gradually eliminated by adopting electronic switches and digital (analog) measurement device flux meter designed replaced, and by software to control the entire testing process. In this paper, referring to the definition of basic magnetization curve, basic hysteresis loop of soft magnetic material is proposed. By studying the DC magnetic measurement method and hardware, satisfactory result is obtained, promoting the development of static magnetic measurement and providing a reference for improvement of related standard.

Key words: soft magnetic materials; DC magnetic property; magnetic measurement; scanning method; basic hysteresis loop; ballistic method

磁性材料是二战后对科技进步和社会发展贡献仅次于半导体的功能材料,软磁材料是磁性材料工业的重要组成部分^[1-3]。磁性材料最基本的参数大都定义在磁滞回线上,所以通常的磁性测量就是磁滞回线的测绘。它们的基本磁性参数测量结果的唯一性、可比性和准确度是评估材料质量、指导研究、应用新型材料的关键,指导着新型磁性材料的研究和开发。传统的冲击检流计法在国际和国家相关标准中均有定义,但由于存在因使用机械开关和冲击检流计^[4]所带来的非瞬时性误差,以及需要有经验工作人员来做测量避免人为操作偏差,测试效率非常低,逐步被采用电子开关和数字(模拟)磁通计所替代,并采用软件控制完成整个测试过程。

目前软磁材料直流磁滞回线的测量国内、外设备通常采用磁场扫描法。但由于样品在磁化过程中涡流对磁化的作用,测量到的磁滞回线受到磁化频率和磁感波形(谐波)的影响,而产生畸变,从而使测量结果失去唯一性,所以尽管这种方法很普遍、很简单,但实际上不可取。扫描法所得到的参数失去了磁性材料测量结果可比性和准确度的基础,已经有相关文献报道这些影响^[5]。

2015年12月,我们提出采用模拟冲击法测试软磁材料直流磁性能,并参照基本磁化曲线的定义,将用这种方法测量得到的磁滞回线称之为该材料的“基本磁滞回线”,得到定义在该回线上的基本磁性参数,包括基本磁滞回线簇顶点连成的基本磁化曲线和定义在这些曲线上的磁性参数。特别是将这个磁滞回线的面积,定义为基本磁化能 $P_u(\text{J}/\text{m}^3)$,作为评价材料磁化损耗的基础。

模拟冲击法的基本条件是两个测量点的“准静态”^[6-7],即 $dH/dt=0$ 、 $dB/dt=0$,考虑到软磁材料磁畴

运动的高速率,满足这个条件比常人想象的容易。我们提出以微机的智能,即它的自适应能力,来产生、控制,并记忆针对不同产品的冲击(激励)波形函数,目标是在保证测量结果的唯一性的前提下,以尽快的速度完成测量。实践结果证明,做到这一点并不困难。

为此,湖南省永逸科技有限公司经过半年的时间实验和研制,基本上完成了该项目,并同时申请了相关专利^[8]。

1 软磁材料基本磁滞回线测量装置

基本磁滞回线测量装置由计算机、打印机、AD/DA 数据采集和控制卡、程控励磁电源、积分器和被测测试样品组成,其装置原理框图和现有扫描法测量装置几乎没有差别。

该测试装置区别于现有装置主要表现为:测量过程采用冲击测量模式,测量点从一个准静态点出发,到达另一个准静态点,装置测量每一次冲击过程起始前和结束后磁场与磁感的变化量(ΔH 和 ΔB)。微机通过测试软件的编程控制,已经成为一台能自学习的控制中心,能针对不同的测试样品,自己学习和自己编程获得适合该材料的测试函数波形,并程控励磁电源,对采样数据进行自我判断,最终获得代表材料直流磁性能唯一性的基本磁滞回线。表 1 给出了设备测试结果重复性的一组实验结果。测试样品材料为 1J79 带材(厚度 0.1 mm)卷绕圆环;样品参数:有效磁路长度 $L_e=88.18$ mm,有效截面积 $A_e=10.44$ mm²,有效体积 $V_e=0.9204$ cm³;励磁绕组 $N_1=20$ 匝,感应绕组 $N_2=20$ 匝,锁定最大励磁磁场 $H_s=80$ A/m 条件,控制 $dB/dt=0.005$ T,点对点冲击时间 $T_{sp}=1$ s。

表 1 1J79 坡莫合金材料采用模拟冲击法测试结果

Table 1 Measurement result of permalloy(1J79) using ballistic method

编号	$P_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_s/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
1	2.481	0.743 3	0.416 1	0.704 6	79.99
2	2.523	0.743 3	0.417 4	0.704 7	79.88
3	2.452	0.743 4	0.415 6	0.704 9	79.88
4	2.423	0.743 7	0.418 8	0.705 8	80
5	2.456	0.743 4	0.416 9	0.705 8	79.88
平均值	2.467	0.743 4	0.417 0	0.705 2	79.93
标准偏差 S	0.037	0.000 2	0.001 2	0.000 6	0.06
S 相对值	1.5%	0.025%	0.03%	0.086%	0.1%

实验中给定的 H_s 是 H_c 的 100 倍,属于深度饱

和状态,测量结果 B_s 、 B_r 、 H_c 的重复性很好。 P_u 由

于回线太窄,重复性变差,实际上材料在交流,特别是高频使用条件下不可能工作在这么深度的饱和状态,在实际应用条件下, P_u 测量结果的重复性要变得好很多。当然,在这样深度饱和的状态下,还能达到 1.5% 的标准偏差,是一个非常好的结果。

表 2 给出了冲击时间 T_{sp} 对测量结果的影响。

表 2 DT4 电工纯铁在设定不同冲击时间下测试的数据

Table 2 Measurement result of pure iron(DT4) using ballistic method with various T_{sp}

编号	$P_u/(J \cdot m^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	$H_s/(A \cdot m^{-1})$	T_{sp}/s
1	875.3	1.721	0.676 7	97.22	6 000	0.1
2	872.7	1.721	0.677	95.65	6 001	0.2
3	874	1.721	0.677 2	94.91	6 000	0.3
4	868.5	1.721	0.677	93.94	6 000	0.4
5	875.2	1.721	0.677	93.46	6 000	0.5
6	877.4	1.721	0.678	93.03	6 001	0.6
7	882.5	1.721	0.676 8	92.93	6 000	0.7
8	873.5	1.721	0.676 7	92.7	6 000	0.8
9	875	1.721	0.676 8	92.59	6 001	0.9
10	879.6	1.721	0.676 8	92.09	6 000	1.0
11	872.7	1.721	0.677 5	91.99	5 995	1.5
12	865.8	1.722	0.677 8	91.92	6 001	2.0
平均值	874.35	1.721 1	0.677 1	93.536	5 999.9	
绝对偏差差	4.46	0.000 5	0.000 6	2.56	3	
相对偏差	0.5%	0.058%	0.019%	5.662%	0.1%	

结论:从测试结果中可以看出,DT4 电工纯铁圆环,只有当冲击时间达到 1 s 以后,材料的 H_c 变化才趋于缓慢,考虑设备测试重复性为 0.3%,认可测试的准确性。从测试数据中同时可以看出, B_s 和 B_r 对冲击时间是不敏感的,在只需要进行对该两项参数测试时,可加快测试速度,提高测试效率。

将冲击法测试时间为 1.5 s 和 2 s 的两个原始数据进行比较,获得两次不同条件下对应的 Bdat 作图,曲线上看重复性好(见),同时经过对典型软磁材料铁氧体 JR40LG、FB45、取向硅钢 23Z110、Q235、1J50、1J79 等都进行了相关性能的测试,不同材料在通过微机自学习获得自适应测试程序后,通过 D/A 控制励磁电源发出励磁函数 $\Delta H(t)$,作用于被测样品,其响应函数 dB/dt 通过比例/积分放大器和 A/D 采样获得,并进行单方向 N 次模拟冲击法循环控制,最后可以获得稳定的基本磁滞回线。

3 软磁材料基本磁性参数测试结果 比对

首先采用 FE-2100SD 软磁材料直流测量装置所具备的扫描法和模拟冲击法对矫顽力较大的软磁

测试样品材料:DT4 电工纯铁;样品参数: $L_e = 112.2 \text{ mm}$, $A_e = 20.32 \text{ mm}^2$, $V_e = 2.279 \text{ cm}^3$;励磁绕组 $N_1 = 99$ 匝,感应绕组 $N_2 = 21$ 匝,锁定最大励磁磁场 $H_s = 6\ 000 \text{ A/m}$,控制 $dB/dt = 0.015 \text{ T}$,冲击时间为变量。

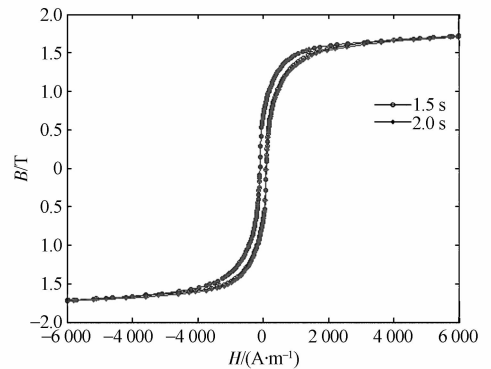


图 1 冲击测量时间为 1.5 s 与 2 s 测量结果数据比较

Fig. 1 Comparison of measurement result with ballistic method($T_{sp} = 1.5 \text{ s}$ and $T_{sp} = 2 \text{ s}$)

材料进行包含磁化曲线和磁滞回线全性能参数的测量。对测试数据进行对比。

材料:DT4 纯铁, $L_e = 112.2 \text{ mm}$, $A_e = 23.9 \text{ mm}^2$, $V_e = 2.681 \text{ cm}^3$, $H_i = 8 \text{ A/m}$,并锁定 $H_s = 10 \text{ kA/m}$,控制 $dB/dt = 0.015 \text{ T}$;扫描法时间为 180 s (磁化曲线约占 60 s),模拟冲击法控制 T_{sp} 为 1 s,获得以下结果。

表 3 DT4 电工纯铁在设定不同冲击时间下测试的数据

Table 3 Measurement result of pure iron(DT4) using ballistic method with various T_{sp}

测试方法	μ_i/k	μ_m/k	$P_u/(J \cdot m^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	$H_s(A \cdot m^{-1})$
扫描法	0.087 79	3.141	921.6	1.844	0.662 3	101	10 000
模拟冲击法	0.238 2	2.608	868	1.843	0.655 8	98.82	999 8

材料: Q235 钢, $L_e = 112.2$ mm, $A_e = 23.9$ mm², $V_e = 2.681$ cm³, $H_i = 8$ A/m, 并锁定 $H_s = 10$ kA/m, 控制 $dB/dt = 0.015$ T; 扫描法时间为 180 s

(磁化曲线约占 60 s), 模拟冲击法控制 T_{sp} 为 1 s, 获得以下结果。

表 4 Q235 电工纯铁在设定不同冲击时间下测试的数据

Table 4 Measurement result of iron(Q235) using ballistic method with various T_{sp}

测试方法	μ_i/k	μ_m/k	$P_u/(J \cdot m^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	$H_s(A \cdot m^{-1})$
扫描法	0.024 94	1.335	1 935	1.536	0.786 7	244.8	9 997
模拟冲击法	0.228	1.235	1 880	1.541	0.780 9	241.6	9 995

结论: 当矫顽力较大时, 采用扫描法与冲击法主要差异在磁化曲线的 μ_i 、 μ_m 和磁滞回线的 P_u 上, 其他参数的差异较小, H_c 越大的材料, 差异越小。两种方法测试的差异与德国 C-750 采用扫描法测试仅给出的两项技术参数不确定度 ($k = 2$), 剩磁 B_r : 1.2%, 矫顽力 H_c : 3.0% 基本吻合。

今年 6 月, 湖南省永逸科技有限公司在浙江杭州进行了扫描法和模拟冲击法测试磁滞回线的比对。参加单位及其测量设备见表 5, 比对测试结果见表 6~15。

表 5 参与比对的单位及其测试设备

Table 5 Information about magnetic instruments involved in this comparative DC test

编号	机构/企业名称	设备名称	测试方法
1	中国计量大学	德国 C-750	扫描法
2	浙江省计量科学院	德国 C-750	扫描法
3	浙江工业大学	日本 SK1100	扫描法
4	永逸科技	FE-2010SD	扫描法
5	永逸科技	FE-2010SD	模拟冲击法

表 6 纳米晶 1K107 带材测量结果对比 (锁定 $H_s = 80$ A/m)

Table 6 Comparative DC magnetic result of nano-crystalline 1K107 ($H_s = 80$ A/m)

测试机构	$P_u/(J \cdot m^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	$H_s/(A \cdot m^{-1})$
浙江计量	2.8	1.25	0.761	0.636	80.1
中国计量	-6.2	1.22	0.729	0.636	80.1
浙江工大	3.644	1.239	0.765	0.65	79.12
永逸扫描	3.42	1.236	0.7514	0.6362	80.03
永逸冲击	3.795	1.246	0.7615	0.637	80.07

表 7 电工纯铁 DT4 测量结果对比 (锁定 $H_s = 10 000$ A/m)

Table 7 Comparative DC magnetic result of pure-iron DT4 ($H_s = 10 000$ A/m)

测试机构	$P_u/(J \cdot m^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	$H_s/(A \cdot m^{-1})$
浙江计量	1 000	1.84	0.742	86	10 000
中国计量	808	1.84	0.738	85.9	10 000
浙江工大	868.5	1.81	0.725	89.47	9 930
永逸扫描	798.6	1.84	0.720 6	89.4	10 000
永逸冲击	847.7	1.852	0.73	84.78	9 997

表 8 MnZn 铁氧体测量结果对比 (锁定 $H_s = 600$ A/m)

Table 8 Comparative DC magnetic result of MnZn ferrite ($H_s = 600$ A/m)

测试机构	$P_u/(J \cdot m^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	$H_s/(A \cdot m^{-1})$
浙江计量	5.4	0.371	0.060 1	4.78	602
中国计量	7.4	0.37	0.060 9	4.86	604
浙江工大	4.861	0.363	0.056 8	4.58	600.4
永逸扫描	4.434	0.361	0.056 34	4.374	598.7
永逸冲击	4.535	0.371 7	0.058 66	4.749	599.8

表 9 铁钴钕合金 1J22 测量结果对比 (锁定 $H_s = 4000$ A/m)

Table 9 Comparative DC magnetic result of FeCo alloy 1J22 ($H_s = 4 000$ A/m)

测试机构	$P_u/(J \cdot m^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(A \cdot m^{-1})$	$H_s/(A \cdot m^{-1})$
浙江计量	494	2.2	1.03	44.9	4 020
中国计量	728	2.22	1.05	45.6	4 010
浙江工大	436.244	2.157 9	1.0072	44.38	3 975
永逸扫描	396.2	2.189	1.014	42.3	3 998
永逸冲击	418.9	2.208	1.028	43.26	3 990

表 10 FB45 铁氧体测量结果对比 (锁定 $H_s=1\ 200\ \text{A/m}$)Table 10 Comparative DC magnetic result of FB45 ferrite ($H_s=1\ 200\ \text{A/m}$)

测试机构	$P_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_s/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
浙江计量	71	0.418	0.256	41.6	1 210
中国计量	72	0.417	0.258	41.8	1 200
浙江工大	68.716	0.408 4	0.247 7	40.716	1 197
永逸扫描	64.83	0.410 3	0.242	39.6	1 199
永逸冲击	63.54	0.415 2	0.246 7	39.23	1 201

表 11 铁镍合金 1J79 测量结果对比 (锁定 $H_s=80\ \text{A/m}$)Table 11 Comparative DC magnetic result of FeNi alloy 1J79 ($H_s=80\ \text{A/m}$)

测试机构	$P_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_s/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
浙江计量	2.8	0.742	0.436	0.746	82.5
中国计量	2.3	0.739	0.443	0.739	80.1
浙江工大	2.581	0.726 9	0.436	0.77	79.78
永逸扫描	2.503	0.738 7	0.451 2	0.763 2	79.95
永逸冲击	2.366	0.744 3	0.449	0.698 7	79.97

表 12 0.5 mm 无取向硅钢测量结果对比 (锁定 $H_s=80\ \text{A/m}$)Table 12 Comparative DC magnetic result of 0.5 mm thickness non-oriented silicon steel ($H_s=80\ \text{A/m}$)

测试机构	$P_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_s/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
浙江计量	403	1.52	0.312	54.3	4 770
中国计量	413	1.52	0.312	54.5	4 830
浙江工大	385.1	1.535 7	0.304 8	53.72	4 970
永逸扫描	368.5	1.531	0.305	52.52	4 998
永逸冲击	339.7	1.537	0.303 7	53.54	4 991

表 13 铁镍合金 1J50 测量结果对比 (锁定 $H_s=1\ 600\ \text{A/m}$)Table 13 Comparative DC magnetic result of FeNi alloy 1J50 ($H_s=1\ 600\ \text{A/m}$)

测试机构	$P_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_s/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
浙江计量	39	1.49	0.934	4.99	1 610
中国计量	42	1.5	0.93	4.93	1 610
浙江工大	39.758	1.46	0.918	6.97	1 600
永逸扫描	34.42	1.48	0.906	6.829	1 599
永逸冲击	29.99	1.493	0.919 4	5.374	1 599

表 14 取向硅钢 23Z110 测量结果对比 (锁定 $H_s=800\ \text{A/m}$)Table 14 Comparative DC magnetic result of grain oriented silicon steel 23Z110 ($H_s=800\ \text{A/m}$)

测试机构	$P_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_s/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
浙江计量	119	1.77	1.43	9.42	800
中国计量	119	1.77	1.42	9.52	802
浙江工大	120.8	1.773	1.423	10.55	798
永逸扫描	114.8	1.769	1.416	10.06	800
永逸冲击	111.1	1.78	1.409	9.408	799.5

表 15 铁粉芯 GS106060 测量结果对比 (锁定 $H_s=10\ 000\ \text{A/m}$)Table 15 Comparative DC magnetic result of iron powder core GS106060 ($H_s=10\ 000\ \text{A/m}$)

测试机构	$P_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	B_s/T	B_r/T	$H_c/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	$H_s/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
浙江计量	110	0.466	0.061	87.8	9 630
中国计量	113	0.469	0.006 2	89	9 800
浙江工大	79.217	0.486 3	0.005 4	76.4	9 948
永逸扫描	65.54	0.480 9	0.004 621	67.12	9 978
永逸冲击	80.73	0.486 8	0.005 776	81.83	9 995

图 2 和图 3 给出了两种测量方式的测试报告。

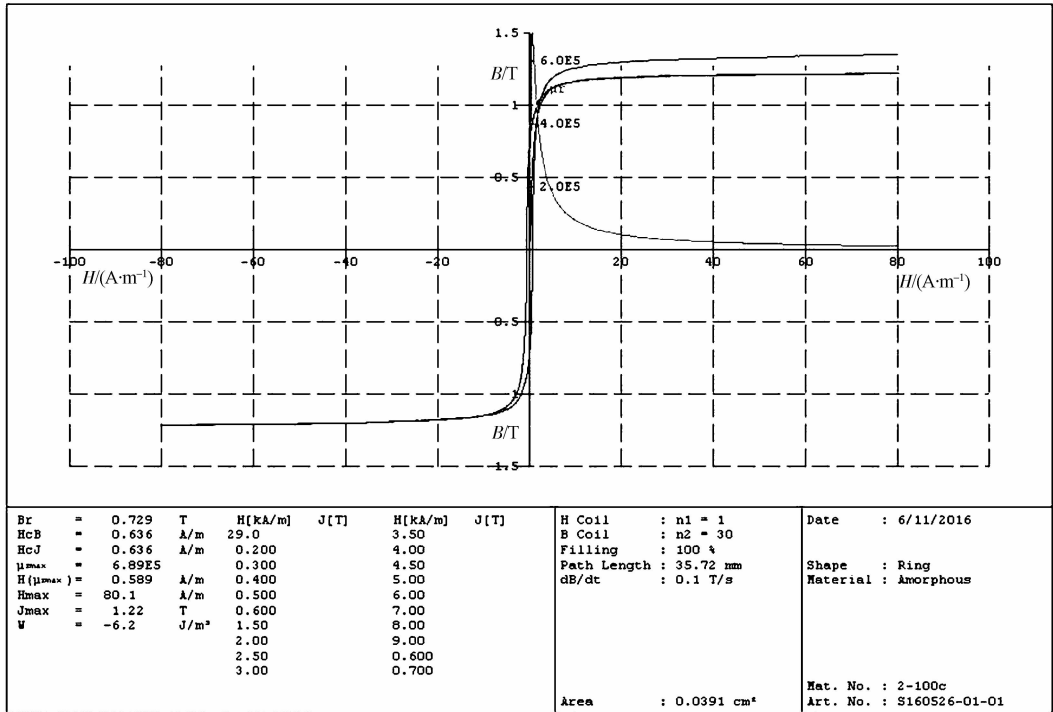


图 2 C-750 磁场扫描法测试报告

Fig. 2 Measurement report by scanning method(C-750)

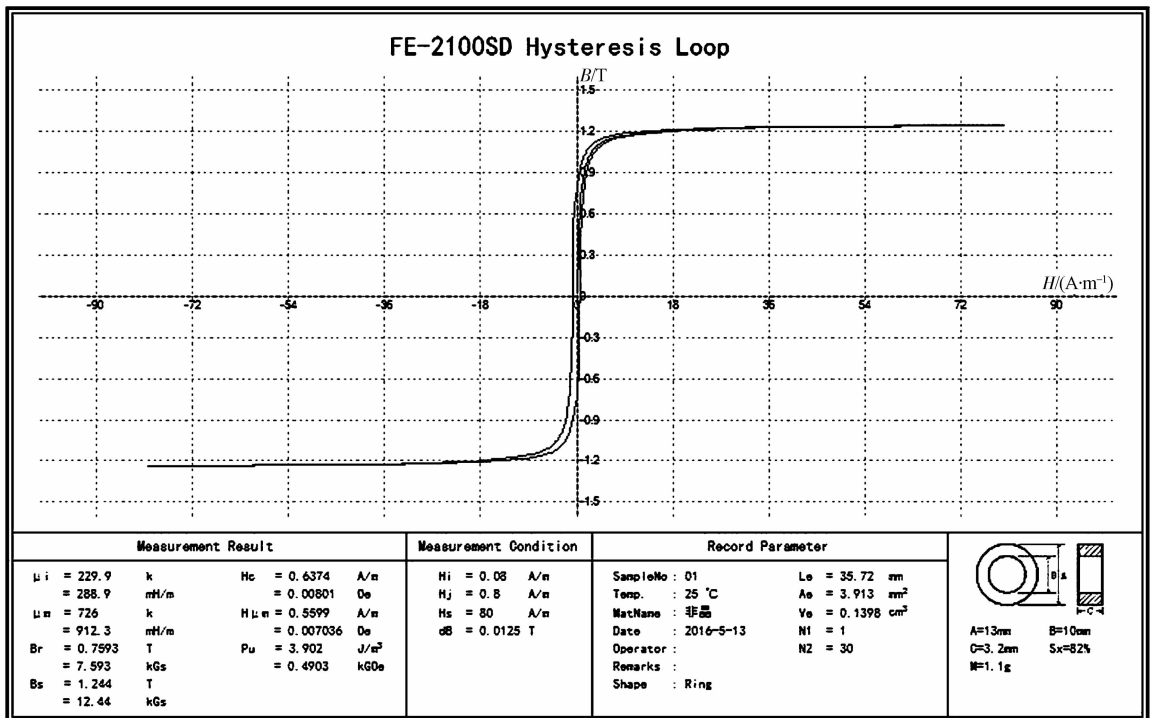


图 3 FE-2100SD 模拟冲击法测试报告

Fig. 3 Measurement report by ballistic method(FE-2100SD)

3 讨论

提出基本磁滞回线的概念和软磁材料基本磁滞回线测量装置的研制成功,全面实现了软磁材料基本磁性参数从定义出发的测量:其中基本磁化曲线即为基本磁滞回线顶点的连线,同时获得了定义在基本磁化曲线上,以及定义在基本磁滞回线的磁性参数,这几乎包括了全部的软磁材料静态磁性参数。

另一个重要的收获是,我们提出了基本磁化能 P_u ($J \cdot m^{-3}$),即基本磁滞回线的面积,并实现了它的测量。它可能成为评价软磁材料交流,特别是高频磁性损耗的基础。因为考虑到磁性材料高频损耗测量时样品自热温升引起测量结果持续的漂移,测量线路电路损耗分离困难等因素,实现这一测量,并获得可靠的、可比的结果是困难的。

采用模拟冲击法进行测试,初始磁导率、最大磁导率均能测试,并具有很好的重复性。和扫描法比较,德国设备和日本设备均不提供初始磁导率参数。最大磁导率可提供,但相互之间差异也较大,这是原理性的缺陷。 P_u 测试中国计量大学所采用的 C-750 在磁滞回线交错的情况下会差异较大,该设备为 2008 年购置,2010 年浙江省计量科学院购置同类型产品,相对数据要好一些。

4 结论

理论上,基本磁滞回线是面积最小的,也就是 P_u 最小的磁滞回线,同时 H_c 也是最小的,上述的

测量结果基本上反映了这一规律,这一次初步的比对实验结果令人鼓舞,要进一步确认和完善这一测量方法,还有待进一步的实验与研究。

6 致谢

感谢中国计量大学刘亚丕教授和浙江工业大学车声雷教授,他们参加了这次进行比对测试实验,并对我们的工作提供了指导和帮助。感谢 University of Federal Defense Munich 陈俊全老师协助对数据的分析。

参考文献:

- [1] Kalathur Narasimhan, Francis Hanejko, Michael LMarucci. 粉末冶金铁基软磁材料的发展与应用[J]. 粉末冶金工业, 2010, 20(2): 43-46.
- [2] 田建军, 张德金, 袁勇, 等. 铁基软磁复合材料成形和热处理工艺研究[J]. 粉末冶金工业, 2011, 21(4): 49-52.
- [3] 刘海顺, 卢爱红, 杨卫明, 等. 非晶纳米晶合金及其软磁性能研究[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2009
- [4] Tumanski S. 磁性测量手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [5] 瞿清昌, 高原, 林安利, 等. 磁性材料测量(讲义)[M]. 北京:中国计量科学研究院内部资料, 1990.
- [6] A341/A341M-2016 Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Soft Magnetic Materials Using D-C Permeameters and the Point by Point (Ballistic) Test Methods[S]. West Conshohocken, USA:A. International, 2016.
- [7] 朱永红. 软磁材料基本磁滞回线测量装置及其测量方法[P]. 中国发明专利:201610212992.3, 2016.