

随着高性能永磁材料(如粘结磁体及纳米晶交换耦合磁体等新材料)的出现,用传统的基于对低矫顽力材料研究而发展起来的永磁测量方法来测量这些材料时出现了许多新的问题,如取样、均匀磁化、饱和磁化及磁场的测量方式等。对这些问题的研究和再认识,对新材料的研究和发展具有重要意义。本文就一些问题进行了定性分析,提出了解决这些问题的方法和途径,并对新出现的一些测量技术进行了分析。

高性能永磁材料磁性测量 若干问题探讨及测量技术进展

中国计量学院理学院应用物理系 刘亚丕

问题的由来

近几年来,我国的永磁材料产业,无论是烧结磁体还是粘结磁体都取得了很大的发展,这主要体现在磁体性能和产量的提高两个方面。如现在我国许多NdFeB磁体生产企业已经可以生产N48、N48BH、N42SH、N35UH等高牌号的NdFeB烧结磁体,有的企业甚至可以生产N53、52M、40UH等世界一流的高牌号产品^[1],并且整个烧结NdFeB永磁材料产业正在向高剩磁Br、高矫顽力HCJ和高磁能积(BH)max指标提升商品化材料水平。国际上产业化的高矫顽力材料的H_{CJ}已经超过2880 kA/m(36 kOe),甚至达到3260 kA/m(41 kOe)^[2],国内H_{CJ}达到1990 kA/m(25 kOe)的产品已经非常普遍,高剩磁材料Br可达1.5 T,普遍可以达到1.4T左右水平;国际上实验室水平已经达到(BH)max=460 kJ/m³(57.8 MGOe)^[3]。Sm-Co系稀土永磁材料的性能虽还远低于其理论值,但其性能也在进一步提升之中。

国产永磁铁氧体厂家已经可以生产FB5系和FB6系产品,实验室已达FB9系

水平。如果软磁相是Fe,纳米晶交换弹性耦合磁体的理论磁能积高达1000 kJ/m³(126 MGOe)^[4],据此估算,其剩磁Br可达到2.24T左右。各向同性和各向异性粘结磁体的性能和产量也在不断提高,新材料和特殊用途永磁材料不断涌现,这些都为永磁测量提出了新的课题。

研制或确定新的磁性材料牌号,都要以材料的各种磁性性能指标为依据,这就使得磁性测量在磁性材料的发展中起着十分重要的作用。如何能够尽可能准确地测量出材料的各种磁性参数,也就成为一个重要的环节。现在普遍采用的一些永磁测量方法及由此而建立起来的一些永磁测量仪器,都是基于传统永磁材料,特别是低矫顽力材料发展起来的。随着永磁材料性能的提高及品种增多,这些传统测量方法的弱点也就显示了出来,并不可避免地出现了一些新问题,由此也出现了一些新的测量方法。只有对这些问题进行深入研究和分析,才能对所测得的各种性能值有更深入的理解,这对新材料的研究无疑是非常有益的。本文拟在这方面做一些初步的探讨,以期引起材料研究人员和生产企业的注意,也为相关的永磁测试人员提供一定的参考。

物质的磁性和物体的磁性

我们都知道,磁性有物体磁性和物质磁性之分。所谓物质磁性,是指与物体的形状、尺寸等无关而只与物质的成份和微观结构等有关的磁性,是物质的内禀属性,也就是通常所说的材料磁性。而物体磁性,是指材料磁性受物体形状、尺寸等影响而表现出来的磁性。例如,开路样品的磁性就与其形状、尺寸等密切相关,这种与样品形状、尺寸等有关的磁性就是物体磁性。在材料研究中,我们一般感兴趣的都是物质磁性,而在使用过程中,我们一般关心的则又是物体磁性。如在磁路设计中,永磁体形状的设计原则是尽量使其工作点在物体的最大磁能积点附近等,就是建立在对材料磁性和物体磁性的分析基础上的,这样设计出的磁体就能把物质磁性最充分地发挥出来。造成物体磁性和物质磁性差异的主要原因是退磁场的存在。在同一磁化场下,物体的磁化强度要小于物质的磁化强度,其原因主要也是由于退磁场的影响。这也是磁性测量不同于一般机械测量或电测量的特殊之处,因此,样品的选择在磁性测量中具有非常重要的意义,即测出的样品磁性(物体磁性)能否反映或代表物质磁性就成为取样的关键。

在磁性材料发展初期,由于材料性能,特别是矫顽力不是很高,一般实验室的磁场都能把样品磁化到饱和,并测量出材料完整的磁滞回线,所以人们关心的大都是物质的磁性,并以此为基础来计算物体的磁性,对磁路设计人员这当然是非常有利的。当时人们做了大量的研究工作,以选择合适的样品形状和大小,如长径比 L/D 、最大饱和磁化场等,尽量使样品磁性 with 物质磁性相接近,即使所测磁性能与样品形状等无关,并由此认为,测量出的样品磁性就是物质磁性,这也是我们制订测试标准和测试仪器标准的一般原则。如果样品具有代表性,就可以以此来测出物质的磁性。

随着永磁材料的发展,材料的矫顽力越来越高,测量所需的磁化场相应地不断提高,特别是饱和充磁所需的磁场,一般的磁化装置很难满足要求。要测量出物体的磁性能,特别是矫顽力,受电磁铁磁场的限制,样品长度就不可能很长。对稀土永磁材料,若以产品为样品进行测量,如果取样不当,或者试样尺寸、形状不同,所测得的物体磁性能就与测量标准样品得到的物质磁性相差甚大,从而不具有代表性。材料性能越高,这种差异就越明显,代表性也就更弱。

对粘结磁体尤其如此。粘结磁体有各向同性和各向异性之分,产品形状及充磁方式多种多样,同是环形样品,充磁方式也有很多种。如,多极磁环的磁性与取一个标准样品的磁性之间的差异是非常明显的:首先,制备磁环和标准样品二者的工艺条件不完全相同,再则二者的磁化状态也不完全相同,使用状态更是差别很大,更何况多极磁环本身由于极数不同,有6极、12极等,使其磁化状态也不尽相同。如果用传统的永磁测试仪器,可能根本就无法测量出非轴向取向的多极磁环的磁性能,但它的磁性是真实存在的,就充分说明了二者之间的差别。

由此不难看出,要测量物体磁性还是物质磁性,就成为一个很重要的问题。现在有的设计图纸中要求的性能一般就是产品性能,也就是物体磁性能,就可以说明这一点。这就要求我们在供货时要清楚对方认可的标准样品大小以得到物质磁性或者直接以产品为样品进行测试来得到物体磁性。

样 品

通常由于测量只能抽样进行,测量出的只能是样品的磁性。样品要具有代表性,就应严格按标准抽取样品,关于抽样原则在标准 GB/T 2828 中已有严格规定。

抽取的样品要加工成符合要求的标准样品,才能进行测试。只有闭合环形样品测得的物体磁特性曲线才与物质磁特性曲线是

作者简介:刘亚丕(1967-),甘肃天水人,1988年毕业于兰州大学物理系磁学专业,获理学学士学位;2000年获兰州大学物理系凝聚态物理学专业磁性薄膜与超晶格,核磁共振方向理学博士学位,为浙江大学材料科学与工程博士后科研流动站与横店集团东磁有限公司国家级博士后科研工作站2002年出站博士后,目前在中国计量学院从事科研与教学工作。

一致的。对开路样品,如果要测量材料磁性 相应地对取样就提出了要求 以保证测出的样品磁特性能充分反映材料磁性。

以前,设计人员一般都希望测量出物质磁性,并以此作为设计依据。但在很多情况下,考虑到测量精度、磁化装置的磁化能力及物质磁性和物体磁性的差异,要获得物质磁性 就必须对试样的几何形状、尺寸、加工工艺和样品内部磁性能的均匀性及取样方法(如在所抽取样品中的取样部位、取样方向等)做出具体规定。为保证样品在磁场均匀区内,试样的尺寸与电磁铁极头的大小之间还须满足一定的关系,这些在现行国家标准GB/T 3217及IEC404-5中都有详细规定,但这些规定在试样的剩磁和矫顽力等都不大的情况下是适用的,这时极头还远未饱和。因为随着极头的饱和,其磁导率会急剧下降,由此使磁场均匀区大为缩小 相应地样品大小也要做相应调整。

由于对高性能材料样品的长径比与其性能之间的关系,也就是在L/D为多大时样品性能就能代表物质磁性能等还缺乏系统研究,为了避免这方面的问题,在材料标准中,一般都约定一个统一的标准样品,以方便相互比较。但应保证所取的标准样品具有充分的代表性。

稀土永磁材料的出现为器件的小型化、微型化提供了条件 即稀土磁体大都具有很小的长径比 退磁场非常大。随着材料性能的进一步提高,所使用材料的体积将进一步缩小。如果直接测量产品(器件)的磁性,由于产品的长径比很小,退磁场很大 这就给其性能的测量带来了许多问题,如样品长度L小 探测线圈的体积就不可能太大等。关于这方面已有文章进行过专门讨论^[5],在此不再赘述。另外,永磁材料还有各向同性与各向异性之分,在取样时应注意 这在下面还要讨论。粘结永磁样品也有其特殊性,也应加以注意。

大块稀土永磁样品的测试,除要求电磁铁要有更大的极头、励磁电源的功率更高、磁通计的量值更宽、充磁设备

的容量更大等之外,也会出现许多问题。如,在磁场均匀区不是很大的情况下,仅探测器(如霍尔片等)的放置位置就会严重影响测量结果^[6]。

材料的均匀磁化问题

对开路样品的测量,主要问题是如何排除样品形状、尺寸等对均匀磁化的影响及其对测量结果的影响。材料的均匀磁化问题包括测量前饱和和充磁时磁化的均匀性和测量中磁化场的均匀性(即磁场均匀性)两个方面。我们知道,因为有退磁场存在,除椭球外,在大小为 \vec{H}_0 的均匀外磁场中,开路样品的磁化都是不均匀的。由于退磁场的作用,样品内部的磁场 \vec{H}_i 并不等于外场 \vec{H}_0 ,它们之间有如下关系:

$$\vec{H}_i = \vec{H}_0 + \vec{H}_d$$

式中 \vec{H}_d 为退磁场。在均匀磁化情况下, $\vec{H}_d = -N\vec{M}$,其中 \vec{M} 是样品的磁化强度,N是退磁因子。N一般不是常数,而是 \vec{M} 及位置的函数。

可见,开路样品受退磁场影响,即使在均匀磁场中其磁化也是不均匀的,因材料各处退磁场的大小是不一样的。因为退磁场的均匀,必然影响到样品磁化的均匀性 这就必然会影响到测量结果。所以要测量物质的磁特性曲线,样品必须做成环形的 以避免退磁场的影响 并使样品均匀磁化。因此,对开路样品,所测得的样品磁特性曲线与物质磁特性曲线有很大差别,且随样品形状和材料不同其差别也不一样。此时测量出的B- H_0 或M- H_0 关系实际是物体(样品)的磁特性曲线,而测出的B- H_i 或M- H_i 关系才是物质的磁特性曲线 因为物质内的实际磁化场是内场 H_i 。

退磁场大小与样品的形状和尺寸等有关。由于样品的退磁场主要决定于样品的几何形状和尺寸,是样品各点位置的函数,所以有退磁场存在时,大多数情况下不能保证样品绝对均匀磁化。理论证明,只有椭球体样品才能满足均匀磁化的要求。在测量中,大多数情况下是设法使样品部

分磁化均匀,测量出均匀磁化部分的磁参数 B 、 M 、 H 来代替材料的真正磁性。为此,必须正确选取样品的形状和尺寸。这一选取要考虑三个因素:使其磁化均匀,使测量有足够的灵敏度,还要减小涡流的影响。

为尽量减小退磁场的影响,在给定误差的情况下,磁导率越高的材料,要求其退磁因子要越小,即要求其长径比 L/D 要更大;对于磁导率低材料,退磁因子可以大些,即长径比 L/D 也可小些^[7]。

由于退磁场不能简单地直接用公式计算出来,所以,应采用合适的磁化装置,尽量能测量出样品的内场,并尽量减小 B 线圈的尺寸,这样,用磁场线圈测量内场 H_i ,开路样品的物质磁性就可由均匀磁化部分的 B 或 M 对内场 H_i 的曲线来描述,以减小样品的形状、尺寸对非均匀磁化的影响及其对测量结果的影响。

由于电磁铁是非闭合磁路,在测量中必须注意样品与极面接触处气隙的影响和磁极尺寸的影响。对大尺寸样品(如 2inch),磁极尺寸会直接影响到极间磁化场的分布。这主要表现在,磁化场不是很强时,电磁铁两个极头间中部的场强沿垂直于极轴轴线的横向距离的增大而减弱的比率要比电磁铁磁极附近的减弱率大。当磁化场增强时,电磁铁两个极头间中部的场强增强,但仍随横向距离增加而减弱,而在电磁铁磁极中心至电磁铁磁极边缘附近,磁场则随横向距离的增大而增强^[8]。

测量低 H_c 材料时,在电磁铁中就可把样品磁化到饱和,此时可认为样品无退磁场,所以对测量结果影响不大。但对高 H_c 样品,一方面,其磁化是在脉冲场或超导螺线管中进行,

此时不但退磁场 H_d 不均匀,而且脉冲场或超导螺线管中磁场的均匀性也是一个问题,况且也很难避免样品在磁化过程中不发生位移,就使得其磁化的均匀性得不到保证。另一

方面,随材料 B_r 和 H_c 增大,测试时极头局部饱和的现象更容易出现,磁化场的均匀性也很难得到保证,加之退磁场不可忽略,其内场将更加不均匀。这两个现象都会严重影响到测量的准确性。

材料的饱和充磁问题

表征永磁材料磁性的 B_r 、 H_c 及 $(BH)_{max}$ 等参量的大小一般都是指先把材料磁化到饱和,再减小磁场所得到的极限磁滞回线上所测得的值,因此,它们的测量值与磁化场的大小是有密切关系的。只有把材料磁化到饱和后再进行测试所得到的参量值才是最大值,才能标志材料的性能。实验证明,对硬磁材料,当 $H = H_m$ 时,其 B_r 和 H_c 等值就不随磁化场的增大而变化,其中 H_m 为最低饱和磁化场,其大小对不同材料是不同的。所以,不同材料的 H_m 在 GB/T 3217 中也做了规定。

IEC404-5 及 GB/T 3217 中规定“当磁化场强度由某一值增加 50% 时,试样的 B_r 和 H_{cB} (或 H_{cJ}) 增加均不超过 1%,该磁场值就被认为是这种永磁材料的最低饱和磁化场强度值”。一般认为,在闭路磁化状况下,对永磁材料,选取 H_m (4~10) H_{cJ} 为宜。其中对 $H_c < 20\text{kA/m}$ 的永磁材料, H_m 一般选取为约 (6~10) H_{cJ} ,对 $H_c > 20\text{kA/m}$ 的高矫顽力永磁材料, H_m 一般选取为约 (4~5) H_{cJ} 。对开路磁化的情况,由于退磁场的影响,其 H_m 要选得更大^[7]。由于高矫顽力材料饱和磁化所需的磁场在电磁铁中很难达到,所以一般都是先脉冲充磁,再进行测量。

按照 IEC404-5 及 GB/T 3217 中的规定,永磁材料的最低饱和磁场为被测样品 H_{cJ} 的 3~5 倍,但由于退磁效应、涡流效应、磁后滞效应等的影响,要使脉冲场和直流场的磁化作用等效,要求脉冲场有更高的峰值,仅用峰值是矫顽力的 3~5 倍来估计充磁磁场显然是不够的。在 GB/T 3217 中对内禀矫顽力大于 600 kA/m 的稀土永磁材料,规定其初始饱和磁化场



为 $1 \sim 1.5H_{CJ}$ ，但标准中也同时说明，要考核其重复性，则需更高的磁化场：“测量前，用脉冲磁化器或超导螺线管磁化试样，最大磁化场至少应为该材料内禀矫顽力 H_{CJ} 的 $3 \sim 5$ 倍”。这就对高矫顽力材料的饱和磁化场提出了更高的要求。对 H_{CJ} 达到 2400 kA/m (30 kOe) 的材料，一般其饱和场至少要 8000 kA/m (100 kOe)，这在一般的脉冲装置中也很难达到，也是一般企业所难以达到的，所以对这种材料的准确测量就存在很大的问题。这样，对同一样品，由充磁磁场差异带来的影响也就成为一个很大的问题。为此，在有的材料标准中，一般都规定一个最低饱和磁化场，以方便比较。

在永磁测量中一般都使用圆柱形和条形样品。这不仅是因为其易于加工，还因为各向异性永磁材料的磁性能与晶粒取向密切相关，采用条形样品可以测出磁的各向异性。高性能稀土永磁材料都是各向异性的，在制造过程中加磁场成型，就决定了其磁化的方向。粘结永磁也有各向同性和各向异性之分。对各向异性样品，充磁方向（测量方向）一定要与其取向一致。前面已经提到，对于这类圆柱形和条形样品，即使是在均匀的外磁化场中，其磁化也是不均匀的。其退磁因子不仅与样品的尺寸、磁化强度的大小等有关，还与磁化历史有关，这就使得饱和磁化更加困难。为此，样品制备好之后，一般要求在磁性测量或充磁前必须将样品充分退磁，而一般的退磁方法很难满足完全退磁的要求，加热退磁又存在氧化和性能改变的风险。

我们都知道，对低 H_c 材料，为使其磁状态稳定及避免磁滞的影响，样品都需在饱和场中进行磁锻炼。磁锻炼是使样品在给定的磁场下达到稳定磁化状态的一种方法，做法是在磁化电流下换向（即反复磁化）若干次。对高矫顽力材料，根本无法进行磁锻炼，这就使得其磁状态很难达到稳定，即很难避免磁滞的影响。所以，脉冲磁化场必须要有足

够的脉冲宽度，否则很难磁化到饱和，或者饱和磁化的效果很难得到保证^[5]。

静态测试与动态测试

磁性材料的磁性能分为动态磁性能和静态磁性能两个方面。静态磁特性是指磁性材料在直流磁场磁化下的磁特性，即磁性材料在直流磁场磁化下得到的基本磁化曲线、磁滞回线及由它们所定义的各种磁参数。磁性材料一般都具有磁滞现象，即材料磁化的变化慢于外磁场变化，这就使得动态磁特性和静态磁特性间有很大的不同，从而测量速度的影响也就变得不容忽视。

永磁材料的磁性能一般都是指静态磁性能，所以永磁测量一般都是在静态下测得的，这样就可以尽可能地消除磁滞的影响。在自动测试中，一般要求进行准静态测试，也就是说测量速度不能快，以实现准静态测试的要求。为进行准确测量，自动测试时必须对测量速度进行控制，特别是在 Br 点和 H_{CJ} 点，应尽可能在准静态条件下进行测试，以保证足够的精度和重复性。

在高 Br 和高 H_{CJ} 材料的测试中，如果测量速度过快，一方面，由于磁滞，会使测试结果不真实；另一方面，对高 Br 材料及在极高的磁场中，材料的磁通密度非常高，根据电磁感应定律，极易引起大的涡流，必定还会伴随样品和磁化装置的涡流自感和磁后效等动态效应的影响，样品的磁状态也难以达到稳定，从而严重影响测量结果，这种影响在 Br 和 H_{CJ} 点上更为突出。另外，对高 H_{CJ} 材料，所需磁化电流很大，将使得测试电源长时间工作在大电流下，测量速度越慢，就要求其耐大电流的能力要越强，对其耐大电流的能力是一个严峻的考验。可见，要获得高的 H_{CJ} 和 Br 准确度，测量速度就一定要慢，以克服磁滞及涡流对测量结果的影响，否则就会得到一个虚假的 H_{CJ} 和 Br 值。

极头饱和带来的影响

永磁样品一般都是放在电磁铁中进行

测量的,主要原因在于这样能构成闭合磁路,以消除退磁场的影响。电磁铁与样品构成闭合磁路的原理在于存在镜像效应^[6]:此时样品的等效长度会变为无限长,因此其退磁因子会减小至零。此时电磁铁的几何形状和使用材料的磁导率值是最重要的因素。电磁铁与样品构成闭合磁路,必须同时满足两个条件:1、电磁铁极头和磁轭应具有较高的磁导率;2、样品端面与极头端面应紧密接触(要求极头和样品端面都必须具有较高的光洁度,且为镜面),极头端面面积远大于样品的截面积。这也就要求极头不能饱和,为磁等位面。

IEC405-5和GB/T3217中都说明:

“工作时,极头中的磁通密度应比其饱和磁通密度低得多,以保证极面近似于磁等位面。实用上,对于电工纯铁极头的磁通密度应小于1T,对于含钴35%~50%的铁钴极头的磁通密度应小于1.2T”。而NdFeB磁体及纳米交换耦合磁体的剩磁均比较高,都超过标准小于1.2T的要求。此

时,极头将不再是磁等位面。

极头饱和对高 H_{CJ} 材料和大块样品的测量将带来较大的影响,因为在测量高Br和高 H_{CJ} 的永磁材料时,极头更易出现饱和或局部饱和现象。当极头饱和时,其磁导率降低,极头内镜像的磁极化强度值将大大减弱,也就是镜像效应将减弱,这使得退磁场的影响变得更不可忽略。另外,也会影响到磁场测量的真实性,这一点在下面还要论述。这些都会影响到测量的准确性。

在这种情况下,样品的长径比对测量结果将产生很大的影响。因为,在一定的长径比下,样品与极头间的镜像效应越强,退磁场的影响将越小。这也是研究长径比对测量结果影响的原因,也是标准中规定样品大小及长度的原因之一。如果样品的长径比、尺寸不符合标准规定,就只能以产品为样品来进行测量了,这样不同仪器的测量结果间的可比性会更强些。

用霍尔探头测量磁场(包括温度系数)带来的影响

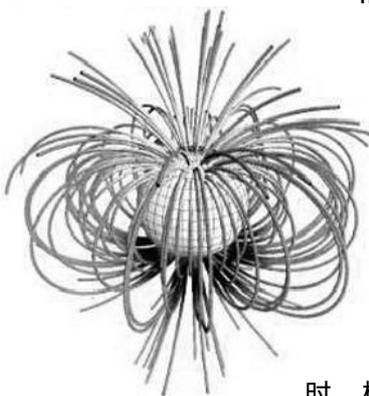
磁场的测量主要有基于电磁感应原理的感应法(包括冲击法、磁通计法、电子积分器等)和基于电磁效应的方法(如霍尔效应法、磁电阻效应法、磁共振法等方法)。在自动测试仪器中,一般都是使用霍尔效应法,即用霍尔磁强计来测量磁场。用霍尔效应测量磁场时,以下一些因素是不能忽视的。

霍尔元件和其他半导体元件一样,对温度变化特别敏感,它的性能参数,如霍尔电压、输入电阻、输出电阻、霍尔灵敏度等都随温度变化而变化,即霍尔元件的性能都会随温度的变化而变化。虽然可以采取一定的补偿措施,但由于这种变化的非线性,很难进行准确补偿,从而使测量结果不真实。

由霍尔效应引起的测量误差主要来自以下四个方面:1、霍尔系数随温度而改变,使得在测量时引入误差,特别是在室温变化时和在测量样品的温度系数时会引入误差;2、磁电阻效应引起的误差:霍尔元件的电阻会随着磁场变化,因此,当供电电压一定时,供电电流会随磁场而改变,这种改变是非线性的,这一影响在被测磁场较强时尤为显著;在一定温度下,当霍尔元件的控制电流恒定时,随磁场增加,霍尔元件的输出电压不呈线性增加,尤其在强磁场情况下更为明显;3、霍尔系数也随磁场而变;4、不等位电动势的误差,这种电势还受温度影响。这些误差都是霍尔元件所固有的,所以是很难避免的。

另外,在测量高Br或高 H_{CJ} 材料时,样品所处的极头区域极可能会饱和,因此,磁体内的磁场比样品旁边气隙中的磁场要小。此时用霍尔探头测得的磁场将不再是样品的内场,从而会引入测量误差。

温度系数(Br)和(H_{CJ})是稀土永磁材料十分重要的参数,特别是对NdFeB永磁,但对其测量方法,国家标准中未给予详细规定。在测量温度系数时,若用霍尔



磁强计来测量磁场,由于霍尔效应本身与温度有关,在高温下也就不适宜于测量磁场,也不适宜用它来测量温度系数较大的材料的磁性能。

可见,当用霍尔磁强计来测量强磁场时,由霍尔效应引入的非线性误差将非常显著,且不可能进行补偿,此时,已经不适宜用来测量磁场强度,对高性能材料尤其如此。现在有些测量仪器用线圈来测量磁场,就不存在上述问题。

测试仪器的其它因素带来的影响

还有一个方面的问题,也应引起足够的重视。现在国内使用的绝大多数永磁自动测试仪器,都须借助标准样品来校准。从严格意义上讲,这种测量方法属于相对测量,而不是绝对测量,当然标准样品也是传递标准的一种方法。但现在所使用的标准样品都是性能不高的铝镍钴或铁氧体磁体,其 H_{CJ} 都很低,根本不能完成全量程的标准传递,即对高性能材料的测试,这种相对测量方法存在很大的局限性。

除以上这些因素之外,影响永磁测量的因素还有很多。例如,在满足IEC404-5及GB/T 3217中对极头尺寸、磁场均匀区范围及样品尺寸等规定的条件下,且在极头没有饱和时,磁场的均匀性才可以得到保证;但当极头饱和时,在极间距不变的情况下,磁场均匀区的半径会明显减少。测量大块样品时,尤其要注意这一点。

测试样品形状对测量结果也会产生很大的影响。对同一材料,不同长径比 L/D 的样品,测量出来的性能可能会有很大差别,对高 B_r 材料及高 H_{CJ} 材料,由于样品形状复杂(不只是矩形或圆形)这种差别可能会更加明显。

对铁氧体永磁,受制造工艺的影响,即使对同一样品,正反两面的性能也会有差别,性能越高,差异可能会越明显,所以铁氧体永磁的测量也有其特殊性。现在有的测量方法规定要测量两

个面的磁性,并取其平均值就是基于这方面的考虑。粘结磁体及纳米复相永磁等的测量也有其特殊性,这主要表现在:粘结磁体一方面磁体形状复杂,充磁方式复杂,又有同性和异性之分,测量时一般都需专门取样,而纳米复相永磁一般也都是做成粘结磁体使用,所以在测量时都应加以注意。

对稀土永磁,开始测量时正向磁化场如果不够大,也会带来影响:由于稀土永磁一般是先充磁,再放到电磁铁中进行测量,此时其磁状态应该在退磁曲线上某一点。测量一开始,还须加正向磁化场,以使样品真正回到剩磁点。材料矫顽力不同,所需的正向磁化场的强度也会有差异。每次测量完成后,极头都会存在一定的剩磁,有时也会影响到测量结果。样品放置不当,在极头与样品间还会产生应力,从而影响测量结果。关于这些,已有文章进行专门讨论^[6],在此不再赘述。另外,在平时还应注意不要损坏极头,保持极头的光洁度和平整度、平行度,并注意清除极头上吸附的异物。

新的测量技术及仪器

基于上面这些原因,国内外一直在研究新的测量技术。这种技术主要体现在两个方面:一种是对传统的测量方法进行改进,以使其能适应新材料发展的需要。人们现在所面临的最大问题是高矫顽力材料的测试问题,现在的普通电磁铁一般都不足以测量出超高矫顽力材料的性能,所以提高电磁铁的测量磁场就成为各个生产测量仪器厂家的主要任务之一。这就需要加大电磁铁的体积,增大励磁电源的功率,相应的仪器价格也就很高。但这样做也会带来很多负面影响,正如前面所提到的,除极头饱和等一系列问题外,电磁铁的功率越大,一方面其线圈的发热也越明显,所能提供的最大磁场值会随电磁铁温度的升高而下降,其效率也就会降低;另一方面就要求测量速度要快,否则电路承受

不了,这样也就不能满足准静态的要求。由于现在能否测量出其矫顽力值是一个主要因素,所以对其准确性的考虑还在其次。德国的玛格力磁电有限公司(Magnet-Physik)对其传统的电磁铁进行优化设计后,在3kW的电源功率下,其EP5型电磁铁的最大磁场可达到超过3.2T的磁场(此时极间距为2mm),同时还能保证相同的测量精度,不能不说是一个进步。

另一种方法是完全抛弃现在基于电磁铁的传统测量方法,这当然是可以理解的。从上面的分析可以看出,传统方法的弊病很难完全得到克服,其发展空间也不是很大,所以就发展出所谓脉冲BH磁场测试装置,这当然是因为脉冲磁场能提供更大的测量磁场,以满足高矫顽力测试的需要。其主要原理是:通过脉冲场使空心线圈发生强磁场(约10~20T或更大),测量在直流测试仪中由于磁极饱和而无法测得的高矫顽力材料的磁特性。中国计量科学研究院电磁处正在进行这方面的研究,并已经取得了很大进展。但这种方法本身也有其局限性。因为这种方法是开路测量,如何进行退磁场修正就是一个很大的问题,所以

参考文献

- [1] 梁树勇,王惠新,苏振华,陆文钊,袁晨斌[J],磁性材料及器件,2005,36(6):1
- [2] 周寿增,董清飞,超强永磁体(第二版)[M],北京,冶金工业出版社,2004:495,627
- [3] 金属功能材料,2004,11(6):4
- [4] Skomski R, Coey J M.[J], IEEE Trans. Magn., 1993, 29: 2860.
- [5] 刘亚丕,葛世慧,磁性材料及器件[J],1999,30(5):60
- [6] 瞿清昌,高原,王京平,林安利,磁性测量讲义[M],中国计量科学研究院,1990
- [7] 王德芳,叶妙元,磁测量[M],北京,机械工业出版社,1990:107
- [8] 兰州大学磁学教研室,磁测量讲义[R],兰州:兰州大学,1985

对样品的要求一般都很高,若要以产品为样品的话,就很难与标准样品测得的值进行对比。还须进行涡流修正,因脉冲场引起的涡流是不容忽视的。另外,脉冲场的均匀性、探测线圈的放置等,都对仪器提出了很高的要求。另外,这种方法还未得到IEC及国家标准的认可,在作为测量方法时,就必须得到用户的认

可。测量速度也是一个很重要的因素。前面已经提到永磁材料主要是测量其直流磁特性,如果测量速度太快,会带来很多问题。由于磁滞的存在,脉冲宽度也不能太窄,以使材料的磁极化强度J(或磁通密度B)能跟上磁场强度H的变化。有的仪器厂家片面强调测量周期短,是很不科学的,也是没有根据的。

主要结论

从以上一些分析可以看出,高性能永磁材料(指Br和H_{CJ}都比较高的材料)磁性能的准确测量涉及许多复杂的因素,如取样方式、均匀磁化、饱和充磁及磁场测量方式等,而这些因素长期以来并未引起足够的重视,所以我们一定要对高性能材料的测试数据,包括其准确性、重复性有一个正确的认识和判断。

高性能永磁材料的准确测量,受许多因素的制约,这些因素在测量低性能材料的性能时可能无关紧要,但要准确测量高性能材料的磁性,就要避免这些因素的影响。只有这样,测出的性能才能具有可比性。对有些高H_{CJ}样品,因受测量线圈体积的限制,样品长度不可能很短,一方面可能根本无法饱和磁化,另一方面电磁铁提供的磁场可能也根本不足以测量出材料的H_{CJ},从而只能测量出H_{CJ}的下限值。由此,如何判定这些材料的性能,如何实现不同仪器间数据的可比性,如何提高测试数据的可信度等,就成为一个非常突出的问题。这些问题如果得不到很好的解决,没有正确的认识,会严重影响到材料的检验,由此也会影响到新材料的正确判定。

对最近出现的一些新的测试仪器及测量方法,如脉冲BH磁场测量装置等,也可以根据上面的这些原则进行分析,以便有一个正确的认识。