

利用脉冲强磁场测量稀土钴永磁合金的磁滞回线

杨伏明 赵沙潮 吴永生 李楚建 于志弘

(中国科学院物理研究所)

近年来,稀土和过渡族金属元素的合金的磁性研究十分活跃,特别是稀土钴永磁合金的出现,无论在磁性基础理论或者是应用方面,都引起了人们很大的兴趣。稀土钴永磁合金显示出优异的永磁性能,如内禀矫顽力 H_c 可高达 3184 kA/m (40 kOe),各向异性场 H_k 超过 15920 kA/m (200 kOe),磁能积 $(BH)_{\max}$ 达到 240 kJ/m^3 (30 MGoe)以上。为了研究稀土钴永磁体的高矫顽力和高各向异性的机制,以便进一步改进工艺条件,提高性能,必须研究样品的磁滞回线。通常的各种磁测仪器不适合这类材料的测量。我们在已有的能产生 40 T ($400,000\text{ G}$)的脉冲磁场设备上建立了一台稀土钴永磁体磁滞回线测试系统,现已投入使用。本系统具有测量迅速、简便、准确、温度范围宽等优点。

脉冲强磁场是将充电时贮存在电容器中的电量,用引燃管作开关,通过磁体线圈放电产生的。当磁体工作于液氮温度,且放电电压为 4.5 kV 时,可以获得 40 T 的峰值磁场。磁体在室温下工作可以获得 30 T 。磁场波形近似于半个正弦波,持续时间为 20 ms 。在磁体轴线中心 2 cm 范围内磁场均匀度优于 7×10^{-3} 。磁场可以倒向,以适合于磁滞回线的测量。

磁化强度 $4\pi M$ 和磁场强度 H 都用通量感应法测量。磁场强度由核磁共振方法、标定的标准线圈测量,而 $4\pi M$ 的值由光谱纯镍标样校准。为了减小样品退磁场的影响,统一考虑测量误差,被测样品和镍标样两者都统一作成直径为 3 mm ,长度为 8.5 mm 的圆柱体。磁场和磁化强度的测量误差都为 2×10^{-2} 。

磁化强度和磁场强度的信号,各自经积分放大后,同时送入双通道瞬态波形存贮器,然后由X-Y记录仪画出 $4\pi M-t$ (t 表示时间)和 $H-t$ 曲线,或者画出磁化曲线和磁滞回线 $4\pi M-H$;也可以将贮存在波形存贮器中的数据送入计算机进行分析。

本装置测量的温度范围为 $77-650\text{ K}$ 。在石英杜瓦中注入液氮,液氮耗尽以后,温度自然回升 ($\sim 3\text{ K/min}$),以实现低温部分的变温。高温部分是通过改变位于探测线圈外侧的加热丝中的功率来控制。

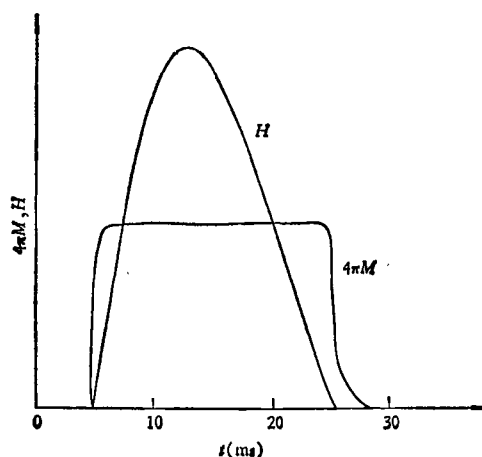


图1 磁场和磁化强度的波形(样品为镍标样)

图1表示磁场的波形 $H-t$ 和镍标样的磁化强度的波形 $4\pi M-t$ 。平顶部分表示磁化达到饱和。

图2(a)表示,本装置所测量的高矫顽力 $\text{Sm}(\text{Co}_{0.67}\text{Cu}_{0.08}\text{Fe}_{0.22}\text{Zr}_{0.03})_8$ 合金在室温下的磁滞回线。同一样品还用具有能产生 8 T 磁场的超导磁体的提拉样品磁强计作了测量,结果如图

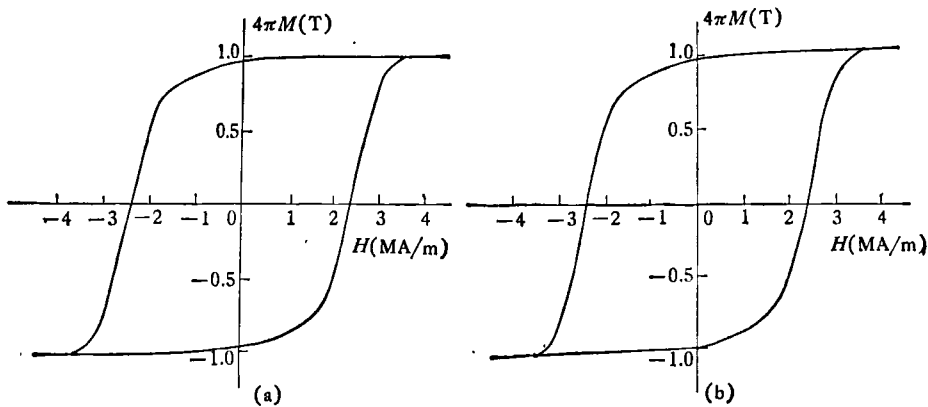


图2 用两种方法所测量的 $\text{Sm}(\text{Co}_{0.47}\text{Cu}_{0.08}\text{Fe}_{0.22}\text{Zr}_{0.03})_3$ 合金室温下磁滞回线的比较 (a) 脉冲法; (b) 提拉法

2(b) 所示。两种方法所测量的磁滞回线的结果是一致的。由上述两种测量所得的磁性参数的比较列于表1。表中 H_c 为内禀矫顽力, $4\pi M_r$ 为剩余磁化强度, H_s 为磁化达到饱和时所对应的磁场。从表1可以看出, 两种方法所得的结果在我们的测量精度内是一致的。提拉样品磁强计测量磁场强度 H 的误差为 $\pm 1 \times 10^{-4}$, 测量磁化强度 M 的误差为 $\pm 1 \times 10^{-3}$ 。

表1 室温下两种测量方法的比较

测量装置	H_c (kA/m)	H_s (kA/m)	H_A (kA/m)	$4\pi M_r$ (T)
提拉样品磁强计	2468	3701		1.028
脉冲场磁测系统	2444	3701	7960	1.018

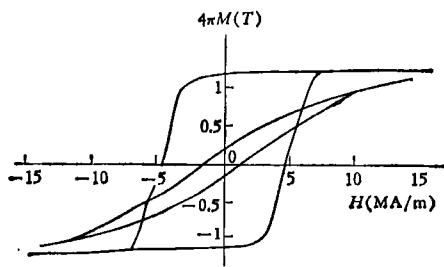


图3 高矫顽力2:17型磁体的易向和难向磁滞回线

图3表示高矫顽力2:17型磁体在77K所测得的易向和难向磁滞回线。将难向磁滞回线延伸, 与易向磁滞回线的饱和部分相交。根据交点的位置, 可以定出各向异性场 H_k 。圆柱样品, 当它的长度 l 与直径 D 之比足够大时, 近似地可以当作旋转椭球看待。当 $l/D = 2.8$

时, 根据 Bozorth^[1] 的表推算, 得退磁因子 $N = 0.1$ 。图4中的虚线表示进行退磁场修正之后的磁滞回线。对于具有高矫顽力且回线矩形度比较好的2:17型磁体来说, 退磁场对回线的影响不大。开路测量带来的另一个问题是, 必须考虑样品周围的杂散磁通的影响。可以认为, 尺寸归一的被测样品和镍标样的散磁场具有相同的分布。因此, 两种情况下的散磁场对磁通贡献的比例亦是相同的。

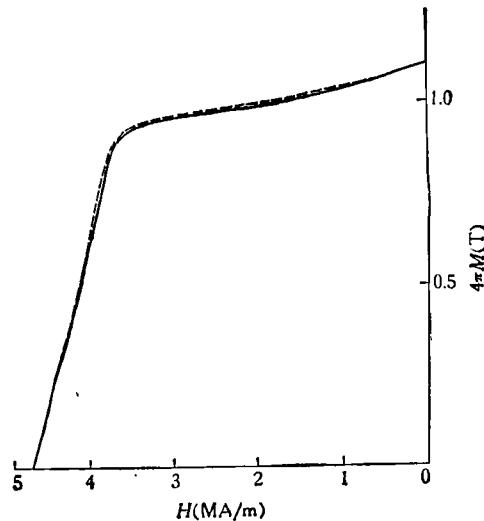


图4 退磁场修正

采用脉冲法测量, 还必须考虑趋肤效应。我们用四端子法测量了高矫顽力2:17型磁体的电阻率 $\rho = 9 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$, 又从磁滞回线上 (下转第526页)