



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112782624 B

(45) 授权公告日 2023. 08. 15

(21) 申请号 202011486928.7

(22) 申请日 2020.12.16

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112782624 A

(43) 申请公布日 2021.05.11

(73) 专利权人 兰州空间技术物理研究所
地址 730000 甘肃省兰州市城关区渭源路
97号

(72) 发明人 缪培贤 刘志栋 杨世宇 冯浩
涂建辉 廉吉庆 王剑祥 张金海
崔敬忠 陈斌

(74) 专利代理机构 北京理工大学专利中心
11120
专利代理师 代丽

(51) Int. Cl.

G01R 33/12 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101408596 A, 2009.04.15

CN 101858963 A, 2010.10.13

CN 103874825 A, 2014.06.18

CN 107015172 A, 2017.08.04

CN 111522067 A, 2020.08.11

US 6201386 B1, 2001.03.13

史新民;李耀明.基于矫顽力的电磁无损检测
测仪的设计.南通职业大学学报.2007,(第04
期),全文.

审查员 姜浩

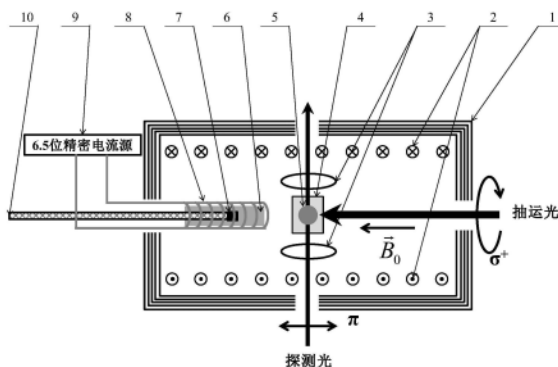
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种软磁材料矫顽力的测量装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种软磁材料矫顽力的测量装置及方法。使用本发明测量装置能够消除地磁场及环境中的杂散磁场对样品的影响,实现对软磁材料矫顽力的测量,测量结果再现性以相对标准偏差表示小于1%。本发明利用抽运-检测型铷原子磁力仪高灵敏度地测量绝对磁场,实现了在连续磁化和退磁软磁样品过程中快速测量出本底磁场、磁化线圈和软磁样品在铷泡空间位置产生磁场的代数,进一步将无样品测量时本底磁场和磁化线圈在铷泡空间位置产生磁场的代数和扣除后,通过软磁样品在铷泡空间位置产生磁场为零的判定条件由退磁电流计算出软磁样品的矫顽力。



1. 一种软磁材料矫顽力的测量装置,其特征在于,包括:抽运-检测型铷原子磁力仪、本底磁场产生组件,以及软磁样品磁化和退磁组件;

其中,本底磁场产生组件包括磁屏蔽筒1和置于磁屏蔽筒1内部的本底磁场线圈2;其中,磁屏蔽筒1用于实现地磁屏蔽,本底磁场线圈2用于在磁屏蔽筒1中产生本底磁场;其中,本底磁场在200nT至20000nT范围内;

抽运-检测型铷原子磁力仪位于磁屏蔽筒1内,其圆偏振抽运光方向与本底磁场方向平行,线偏振探测光方向与本底磁场方向垂直;抽运-检测型铷原子磁力仪用于测量其内铷泡空间位置的磁感应强度;抽运-检测型铷原子磁力仪工作时处于开环状态,其射频磁场线圈输入的正弦激励信号频率设定为与本底磁场对应的拉莫尔进动频率;

软磁样品磁化和退磁组件包括样品室6、磁化线圈8、6.5位精密电流源9和样品传送杆10;其中,样品室6位于磁屏蔽筒1内,磁化线圈8缠绕在样品室6上,样品传送杆10用于将软磁样品7放置在样品室内且位于磁化线圈8的正中心,测量时磁化线圈8、样品室6和软磁样品7相对位置固定不变;6.5位精密电流源9向磁化线圈8连续地输入正向或反向的电流,产生的均匀磁场用于实现对软磁样品7的磁化和退磁;

软磁样品7的磁化强度由饱和值减小到零时所需磁化线圈8中连续退磁的磁场强度即为软磁材料的矫顽力。

2. 如权利要求1所述的软磁材料剩磁矫顽力的测量装置,其特征在于,磁化线圈8的中心与铷泡5的间距 $\geq 10\text{cm}$ 。

3. 如权利要求1所述的软磁材料剩磁矫顽力的测量装置,其特征在于,所述磁屏蔽筒1为圆柱形,直径为 $\phi 500\text{mm}$,长度大于或等于700mm。

4. 如权利要求1所述的软磁材料剩磁矫顽力的测量装置,其特征在于,磁屏蔽筒1替换为磁屏蔽系数优于 10^{-3} 的磁屏蔽室。

5. 如权利要求1所述的软磁材料矫顽力的测量装置,其特征在于,6.5位精密电流源9输出的磁化电流持续时间在2s~20s之间;抽运-检测型铷原子磁力仪工作在磁化电流输出打开的条件下,预留抽运-检测型铷原子磁力仪测量磁场的的时间超过其两个工作周期。

6. 如权利要求1所述的软磁材料矫顽力的测量装置,其特征在于,软磁样品磁化和退磁组件还包括无磁恒温系统,用于样品室6的温度保持恒定不变。

7. 一种软磁材料矫顽力的测量方法,其特征在于,采用如权利要求1~6任意一项所述的测量装置进行测量,包括如下步骤:

步骤1、启动抽运-检测型铷原子磁力仪,根据抽运-检测型原子磁力仪测量的磁场值调节通入本底磁场线圈2的电流大小,使本底磁场在200nT~20000nT范围内;设定磁屏蔽筒内样品室6与铷泡5的间距;

步骤2、在样品室6中无样品的条件下,6.5位精密电流源9以设定步长连续地由正向最大电流减小到负向最大电流,然后再从负向最大电流增大到正向最大电流,循环测量1次,在此过程中抽运-检测型原子磁力仪测量并记录铷泡5空间位置的磁场,该磁场即为本底磁场和磁化线圈8在铷泡5空间位置产生磁场的代数和;

步骤3、用样品传送杆10将软磁样品7置于磁化线圈8的正中心,再次执行与步骤2中相同的扫描测量过程,循环测量n次,抽运-检测型原子磁力仪测量并记录铷泡5空间位置的磁场,该磁场即为本底磁场、磁化线圈8和软磁样品7在铷泡5空间位置产生磁场的代数和;

步骤4、将步骤3的每个循环中相同电流下测得的磁场值减去步骤2测得的磁场值,得到循环测量过程中软磁样品7在铷泡5空间位置产生的一系列磁场值;

步骤5、将步骤4中获得的一系列磁场值作图,其中,横坐标为通入磁化线圈8的连续电流,纵坐标为软磁样品7在铷泡5空间位置产生的磁场,得到n次循环测量的回线,每次回线中纵坐标磁场值为零时对应的横坐标正向电流和负向电流分别为 I_{c+} 和 I_{c-} ;磁化线圈通入 I_{c+} 和 I_{c-} 电流时产生的磁场强度为 $H_{c+}=CI_{c+}/\mu_0$ 和 $H_{c-}=CI_{c-}/\mu_0$,软磁样品矫顽力取值为 $(H_{c+}-H_{c-})/2$,回线偏置为 $(H_{c+}+H_{c-})/2$ 。

8.如权利要求7所述的测量方法,其特征在于,所述步骤5中,若无法获得 H_{c+} 和 H_{c-} ,则返回步骤1增大本底磁场值,并增加样品室6与铷泡5的间距,然后执行步骤2~5,直至测量出软磁样品7的矫顽力。

一种软磁材料矫顽力的测量装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及磁场测量技术领域,具体涉及一种基于抽运-检测型铷原子磁力仪的软磁材料矫顽力的测量装置及方法。

背景技术

[0002] 磁性材料矫顽力定义为使试样的磁化强度由饱和值减小到零时所需要的磁场强度。在磁性材料测量领域,目前广泛使用的精密磁强计有超导量子干涉器件(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)磁强计、振动样品磁强计(Vibrating Sample Magnetometer, VSM)、交变梯度磁强计(Alternating Gradient Magnetometer, AGM)、提拉样品磁强计(Extracting Sample Magnetometer)、磁光克尔效应磁强计(Magneto-optical Kerr Effect, MOKE)等。其中SQUID磁强计的灵敏度最高(高出VSM两个数量级),可靠性和重复性好,对小尺寸或微量样品磁性测量具有很强的优越性。然而,SQUID要获得微弱的背景磁场是困难的,在超导磁体电流为零时,由于冻结磁通,剩余磁场可达几十高斯,这对软磁材料矫顽力测量会造成很多测量错误。例如文献“于红云,超导磁体剩余磁场对软磁材料测试的影响[J].物理学报,2014,63(4):047502.”中指出,SQUID超导磁体退磁后剩余磁场有时大于30Gs,由此产生的磁场误差将导致测试的矫顽力、剩磁等数据不准确,甚至导致反向的磁滞回线。其他精密磁强计在测量微弱磁场时精度不高,且这些磁强计未屏蔽地磁场,它们测量软磁材料矫顽力时精度和复现性较差。

[0003] 目前工业上采用抛移测量方法来测量软磁材料的矫顽力(软磁材料矫顽力的抛移测量方法.国家标准GB/T 3656-2008),具体做法是:长条形软磁样品外有两个螺线管A和B,其中螺线管A连接直流电源,螺线管B连接检流计;先给螺线管A通大电流饱和磁化样品,再缓慢降低电流至零,反向调节电流至 I_c 使样品退磁,抛移操作使螺线管B与样品从中心重合位置迅速抛移至螺线管B处于样品端头外 $35\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 位置,观察检流计偏转,反复试验取检流计无偏转时的电流 I_c ,换算出矫顽场 H_c 。标准结果表明,若测量符合标准规定,矫顽力 H_c 的测量结果再现性以相对标准偏差表示为3%。由于软磁材料磁性弱,该标准要求软磁材料试样为长条形,长宽(或直径)比不小于10,棒形试样推荐尺寸为:试样长 $200\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$,直径 $10\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$,因此该标准不适于小尺寸或微量软磁样品的矫顽力的测量。

[0004] 目前工业上也可采用开磁路测量软磁材料的矫顽力(在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法.国家标准GB/T 13888-2009.),具体原理是将一个磁性试样放入非常均匀并且单向的磁场中,只要试样的磁化强度不为零,由于叠加效应,原来的磁场将发生畸变。如果在试样上施加一退磁场,使试样的磁化强度变为零,试样处于完全退磁状态,磁场的畸变消失,此退磁场的大小等于内禀矫顽力。采用该国家标准测量软磁材料的矫顽力时,对内禀矫顽力小于 40A/m 或大于 40A/m 的软磁材料,测量复现性分别小于等于5%或2%。然而该国家标准测量方法中磁场畸变的测量采用振动的磁场线圈、霍尔探头或磁通门探头,这些都不属于高精度的绝对磁场测量装置,例如霍尔探头和磁通门测量精度低且有显著的零点漂移现象,因此进一步提高软磁材料矫顽力的测量精度和复现性比较困难。

[0005] 综上所述,在测量软磁材料矫顽力的方法中,SQUID磁强计超导磁体电流为零时剩余磁场可达几十高斯,这对软磁材料矫顽力测量造成很多测量错误;国家标准GB/T 3656-2008和国家标准GB/T 13888-2009测量软磁材料矫顽力的方法中磁场测量的精度有限,且都不属于绝对磁场测量,进一步提高软磁材料矫顽力测量精度和测量复现性难度较大。

发明内容

[0006] 有鉴于此,本发明提供了一种基于抽运-检测型铷原子磁力仪的软磁材料矫顽力的测量装置及方法,能够消除地磁场及环境中的杂散磁场对样品的影响,实现对软磁材料矫顽力的高精度测量,测量结果再现性以相对标准偏差表示小于1%。软磁样品可选择适用于SQUID磁强计的小尺寸或微量样品,也可选择国家标准GB/T 3656-2008(软磁材料矫顽力的抛移测量方法)中描述的大尺寸样品。

[0007] 本发明的软磁材料矫顽力的测量装置,包括:抽运-检测型铷原子磁力仪、本底磁场产生组件,以及软磁样品磁化和退磁组件;

[0008] 其中,本底磁场产生组件包括磁屏蔽筒和置于磁屏蔽筒内部的本底磁场线圈;其中,磁屏蔽筒用于实现地磁屏蔽,本底磁场线圈用于在磁屏蔽筒中产生本底磁场;其中,本底磁场在200nT至20000nT范围内;

[0009] 抽运-检测型铷原子磁力仪位于磁屏蔽筒内,其圆偏振抽运光方向与本底磁场方向平行,线偏振探测光方向与本底磁场方向垂直;抽运-检测型铷原子磁力仪用于测量其内铷泡空间位置的磁感应强度;抽运-检测型铷原子磁力仪工作时处于开环状态,其射频磁场线圈输入的正弦激励信号频率设定为与本底磁场对应的拉莫尔进动频率;

[0010] 软磁样品磁化和退磁组件包括样品室、磁化线圈、6.5位精密电流源和样品传送杆;其中,样品室位于磁屏蔽筒内,磁化线圈缠绕在样品室上,样品传送杆用于将软磁样品放置在样品室内且位于磁化线圈的正中心,测量时磁化线圈、样品室和软磁样品相对位置固定不变;6.5位精密电流源向磁化线圈连续地输入正向或反向的电流,产生的均匀磁场用于实现对软磁样品的磁化和退磁;

[0011] 软磁样品的磁化强度由饱和值减小到零时所需磁化线圈中连续退磁的磁场强度即为软磁材料的矫顽力,其实验判定条件是连续退磁过程中软磁样品在铷泡空间位置产生的磁场为零,此时抽运-检测型铷原子磁力仪输出的磁场值为本底磁场和磁化线圈在铷泡空间位置产生磁场的代数和。

[0012] 较优的,磁化线圈的中心与铷泡的间距 $\geq 10\text{cm}$ 。

[0013] 较优的,所述磁屏蔽筒为圆柱形,直径为 $\phi 500\text{mm}$,长度大于或等于700mm。

[0014] 较优的,为了满足不同类型、不同尺寸软磁材料剩磁矫顽力的测量,磁屏蔽筒可替换为磁屏蔽系数优于 10^{-3} 的磁屏蔽室。

[0015] 较优的,6.5位精密电流源输出的磁化电流持续时间在2s~20s之间;抽运-检测型铷原子磁力仪工作在磁化电流输出打开的条件下,预留抽运-检测型铷原子磁力仪测量磁场的时间超过其两个工作周期。

[0016] 较优的,软磁样品磁化和退磁组件还包括无磁恒温系统,用于样品室的温度保持恒定不变。

[0017] 本发明还提供了一种软磁材料矫顽力的测量方法,采用上述测量装置进行测量,

包括如下步骤:

[0018] 步骤1、启动抽运-检测型铷原子磁力仪,根据抽运-检测型原子磁力仪测量的磁场值调节通入本底磁场线圈的电流大小,使本底磁场在200nT~20000nT范围内;设定磁屏蔽筒内样品室与铷泡的间距;

[0019] 步骤2、在样品室中无样品的条件下,6.5位精密电流源以设定步长连续地由正向最大电流减小到负向最大电流,然后再从负向最大电流增大到正向最大电流,循环测量1次,在此过程中抽运-检测型原子磁力仪测量并记录铷泡空间位置的磁场,该磁场即为本底磁场和磁化线圈在铷泡空间位置产生磁场的代数和;

[0020] 步骤3、用样品传送杆将软磁样品置于磁化线圈的正中心,再次执行与步骤中相同的扫描测量过程,循环测量n次,抽运-检测型原子磁力仪测量并记录铷泡空间位置的磁场,该磁场即为本底磁场、磁化线圈和软磁样品在铷泡空间位置产生磁场的代数和;

[0021] 步骤4、将步骤3的每个循环中相同电流下测得的磁场值减去步骤2测得的磁场值,得到循环测量过程中软磁样品在铷泡空间位置产生的一系列磁场值;

[0022] 步骤5、将步骤4中获得的一系列磁场值作图,其中,横坐标为通入磁化线圈的连续电流,纵坐标为软磁样品在铷泡空间位置产生的磁场,得到n次循环测量的回线,每次回线中纵坐标磁场值为零时对应的横坐标正向电流和负向电流分别为 I_{c+} 和 I_{c-} ;磁化线圈通入 I_{c+} 和 I_{c-} 电流时产生的磁场强度为 $H_{c+}=CI_{c+}/\mu_0$ 和 $H_{c-}=CI_{c-}/\mu_0$,软磁样品矫顽力取值为 $(H_{c+}-H_{c-})/2$,回线偏置为 $(H_{c+}+H_{c-})/2$ 。

[0023] 较优的,所述步骤5中,若无法获得 H_{c+} 和 H_{c-} ,则返回步骤1增大本底磁场值,并增加样品室与铷泡的间距,然后执行步骤2~5,直至测量出软磁样品的矫顽力。

[0024] 有益效果:

[0025] (1) 采用本发明的测量装置及方法,在实施例一中坡莫合金带软磁样品矫顽力的10次平均测量结果为40.63A/m,测量再现性以相对标准偏差表示为0.16%;实施例二采用国家标准GB/T 13888-2009开磁路测量相同软磁样品的矫顽力,10次平均测量结果为38.64A/m,测量结果再现性以相对标准偏差表示为3.53%;本发明实验装置实现了软磁样品矫顽力的高精度测量,复现性良好。

[0026] (2) 抽运-检测型铷原子磁力仪是高灵敏度的绝对磁场测量装置,其组成和工作原理见已授权的发明专利“一种铷原子磁力仪及其磁场测量方法”(申请号为:CN201710270545.8),其量程为100nT~100000nT,在磁屏蔽筒中500nT背景磁场下灵敏度达到 $0.2\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$,本发明中能够实现在开环状态下测量与本底磁场偏离1nT至10000nT范围内的绝对磁场,最终能够实现软磁样品矫顽力的测量。相比于Mz和Mx光泵原子磁力仪(optical pumping magnetometer, OPM)、相干布局囚禁原(coherent population trapping, CPT)子磁力仪、无自旋交换弛豫(spin-exchange relaxation free, SERF)原子磁力仪,抽运-检测型原子磁力仪具有量程宽、灵敏度高、开环测量范围宽、闭环锁频能力强的优点;相比于SQUID、磁通门、霍尔探头等磁强计,抽运-检测型铷原子磁力仪具有无剩磁、无零点漂移的特点,它具备测量软磁样品磁矩、矫顽力、剩磁矫顽力,各类磁特性曲线的能力,本发明测量装置有望针对磁性材料物理性质提供丰富的测量手段。

附图说明

[0027] 图1为本发明测量装置的结构图。

[0028] 其中,1—磁屏蔽筒,2—本底磁场线圈,3—射频磁场线圈,4—铷泡加热模块,5—铷泡,6—样品室,7—软磁样品,8—磁化线圈,9—6.5位精密电流源,10—样品传送杆。

[0029] 图2为本发明软磁材料矫顽力测量方法中6.5位精密电流源输出电流的时序示意图。

[0030] 图2中:软磁材料磁化或退磁过程中精密电流源输出电流打开后持续2.5秒,在持续2秒后的0.5秒内抽运-检测型原子磁力仪完成1次磁场测量。

[0031] 图3为样品室6内有、无坡莫合金带软磁样品时分别进行的循环测量结果。

[0032] 图3中:本底磁场被设定为500nT,设置精密电流源连续扫描过程为:以步长0.03A从1A至0.01A,以步长0.5mA从0.01A至-0.01A,以步长0.03A从-0.01A至-1A,以步长0.03A从-1A至-0.01A,以步长0.5mA从-0.01A至0.01A,以步长0.03A从0.01A至1A;样品室6内有样品时按照上述过程循环测量10次,样品室6内无样品时按照上述过程循环测量1次;插图显示样品室6内无样品时部分测量数据的放大图。

[0033] 图4为对图3进行数据处理得到的结果。

[0034] 图4底部横坐标为通入磁化线圈的连续电流,顶部横坐标换算成电流在磁化线圈内产生的磁场强度,纵坐标为图3中样品室6内有样品测量循环的磁场值减去无样品测量循环的磁场值得到的结果,即样品在铷泡5空间位置产生的磁场。

[0035] 图5为图4中循环测量的平均矫顽力。

[0036] 将图4中横坐标正半轴或负半轴对应纵坐标磁场值接近零的5个数据点进行线性拟合(2mA的范围被分割为100个点),对应的横坐标正向电流和负向电流分别为 I_{c+} 和 I_{c-} ;磁化线圈通入 I_{c+} 和 I_{c-} 电流时产生的磁场强度为 $H_{c+}=CI_{c+}/\mu_0$ 和 $H_{c-}=CI_{c-}/\mu_0$,软磁样品矫顽力取值为 $(H_{c+}-H_{c-})/2$,其中用霍尔探头标定的线圈系数为7.3574mT/A。10次平均矫顽力为40.63A/m,测量再现性以相对标准偏差表示为0.16%。

[0037] 图6为图4中循环测量的回线偏置。

[0038] 图6中,回线偏置由 $(H_{c+}+H_{c-})/2$ 计算得到,10次平均的回线偏置为-0.96A/m。

[0039] 图7为国家标准GB/T 13888-2009(在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法)文件中图3方法B实验装置的示意图。

[0040] 图7中1为螺线管,等效于本发明中的磁化线圈;2为试样,等效于本发明中的软磁样品;5为差分探头,实施例二中仅采用一个霍尔探头。

[0041] 图8为将图7的实验装置放入磁屏蔽筒1内,以国家标准GB/T 13888-2009中描述的方法用单个霍尔探头测量与实施例一相同软磁样品矫顽力的实验结果。

[0042] 图8中,(a)图是10次循环霍尔探头测量样品漏磁与磁化线圈中磁场强度的依赖关系;(b)图是(a)图部分数据的放大图;(c)图是将(b)图中横坐标正半轴或负半轴对应纵坐标磁场值接近零的5个数据点进行线性拟合求每个回线的平均矫顽力,10次循环测量的平均矫顽力为38.64A/m,测量再现性以相对标准偏差表示为3.53%;(d)图显示(b)图中回线的偏置。

[0043] 图9为超导量子干涉器件(SQUID)磁强计测量与实施例一相同软磁样品矫顽力的实验结果。

[0044] 图9中,平均矫顽力大约为42.15A/m,回线偏置为229.74A/m。

具体实施方式

[0045] 下面结合附图并举实施例,对本发明进行详细描述。

[0046] 本发明提供了一种基于抽运-检测型铷原子磁力仪的软磁材料矫顽力的测量装置及方法,采用连续电流磁化和退磁软磁样品,能够测量软磁材料的矫顽力,且一个测量循环就可确定软磁样品矫顽力,效率高、精度高、复现性好。

[0047] 本发明采用抽运-检测型原子磁力仪测量软磁样品矫顽力的测量装置如图1所示,包括:抽运-检测型铷原子磁力仪、本底磁场产生组件、以及软磁样品磁化和退磁组件。

[0048] 抽运-检测型铷原子磁力仪的组成及工作原理见已授权的发明专利“一种铷原子磁力仪及其磁场测量方法”(申请号为:CN201710270545.8),其量程为100nT~100000nT,在开环状态下能够测量与本底磁场偏离1nT至10000nT范围内的绝对磁场;本发明实施例一及图1中抽运-检测型铷原子磁力仪仅列出了射频磁场线圈3、铷泡加热模块4和铷泡5三个组件,它们被放置在本底磁场产生组件的磁屏蔽筒1中,置于本底磁场2的磁场均匀区。抽运-检测型铷原子磁力仪用于测量本底磁场、磁化线圈和软磁样品在铷泡空间位置产生磁场的代数和,该原子磁力仪具有量程宽、灵敏度高、开环测量范围宽、闭环锁频能力强的优点,而且其工作物理过程可用程序快速操控,能够实现在连续磁化和退磁软磁样品过程中快速读取准确磁场值;本发明中抽运-检测型铷原子磁力仪工作时处于开环状态,射频磁场线圈输入的正弦激励信号频率设定为与本底磁场对应的拉莫尔进动频率。

[0049] 本底磁场产生组件包括磁屏蔽筒1和本底磁场线圈2,磁屏蔽筒1主要用于屏蔽地磁场,本底磁场线圈2轴对称地置于磁屏蔽筒1的内部,用于在磁屏蔽筒1内产生轴向均匀稳定的本底磁场,抽运-检测型铷原子磁力仪的圆偏振抽运光的方向与本底磁场方向平行,线偏振探测光的方向与本底磁场方向垂直。其中,优选地,磁屏蔽筒1可采用圆柱形,其内部尺寸为 $\phi 500\text{mm} \times 700\text{mm}$ 或更大,如增大磁屏蔽筒1轴向尺寸后测量结果会更好;或者将磁屏蔽筒1替换为磁屏蔽系数优于 10^{-3} 的磁屏蔽室。大尺寸磁屏蔽筒1或磁屏蔽室能够显著降低软磁样品7脉冲磁化或退磁过程中对磁屏蔽筒磁化状态的影响,保证本底磁场的稳定,同时增加软磁样品磁化和退磁组件与铷泡5间距的可调节范围,有利于不同种类、不同尺寸软磁样品矫顽力的测量;与磁屏蔽筒1配套的本底磁场线圈2能够在铷泡5区域产生均匀的本底磁场,磁场梯度小于1%,以保证抽运-检测型原子磁力仪的最佳工作条件;由抽运-检测型原子磁力仪测量标定的本底磁场取值设定在200nT~20000nT范围内。

[0050] 软磁样品磁化和退磁组件包括样品室6、软磁样品7、磁化线圈8、6.5位精密电流源9和样品传送杆10。其中,样品室6和磁化线圈8位于磁屏蔽筒1内,样品室6位于磁化线圈8的磁场均匀区,样品传送杆10用于将软磁样品7放置在磁化线圈8的正中心,测量时磁化线圈8、样品室6和软磁样品7相对位置固定不变;用6.5位精密电流源9连续地向磁化线圈8输入正向或反向的电流,产生的均匀磁场用于实现对软磁样品7的磁化和退磁;磁屏蔽筒内磁化线圈8中心位置与铷泡5的间距一般设定 $\geq 10\text{cm}$ 。

[0051] 在进行连续磁化和退磁时序设置时,磁化电流持续时间一般在2s~20s之间,这个持续时间取决于软磁材料的磁导率、电导率和厚度,磁化电流持续时间以保证磁化场完全穿透材料;抽运-检测型铷原子磁力仪测量磁场时保持磁化电流不变,预留测量窗口时间应

大于原子磁力仪工作周期的两倍。

[0052] 为分析软磁样品7的磁化和退磁过程,以及软磁样品7的磁化状态,一般需对测量装置的磁场方向进行约定,一般可选本底磁场线圈2产生的本底磁场方向作为测试装置磁场的正方向,相应地可定义磁化线圈8产生磁场的方向;但不限于这种设定,只是这样的设定更利于软磁样品磁化状态的分析。

[0053] 其中,本底磁场线圈2、样品室6、磁化线圈8和样品传送杆10由非磁性材料制成;为提高软磁样品矫顽力的测量精度,一般会多做几次测试,稳定后计算获得矫顽力;为提高软磁样品矫顽力测量结果的再现性和准确性,较优的做法是让样品室6保持恒定温度。为此,所述软磁样品磁化和退磁组件还可以包括一个无磁恒温系统,根据实验需要设定测量温度,在测量过程中确保样品室6的温度保持恒定不变。

[0054] 本发明的基于上述测量装置进行软磁材料矫顽力测量的方法如下:

[0055] 步骤1、启动抽运-检测型铷原子磁力仪,通过抽运-检测型原子磁力仪输出的磁场值调节通入本底磁场线圈2的电流大小来设定本底磁场大小,使本底磁场设定值在200nT~20000nT范围内;设定磁屏蔽筒内软磁样品磁化和退磁组件与铷泡5的间距;

[0056] 步骤2、在样品室6中无样品的条件下,用计算机控制6.5位精密电流源9的输出电流以设定步长连续地由正向最大电流减小到负向最大电流,然后再从负向最大电流增大到正向最大电流,循环测量1次,在此过程中抽运-检测型原子磁力仪测量并记录本底磁场和磁化线圈在铷泡5空间位置产生磁场的代数和;

[0057] 步骤3、用样品传送杆10将软磁样品7置于磁化线圈8的正中心,再次执行与步骤2中相同的扫描测量过程,循环测量n次,抽运-检测型原子磁力仪测量并记录本底磁场、磁化线圈和软磁样品在铷泡5空间位置产生磁场的代数和;

[0058] 步骤4、处理步骤2和步骤3获得的测量数据,每个循环中相等电流下用步骤3测得的磁场值减去步骤2测得的磁场值,得到循环测量过程中软磁样品在铷泡5空间位置产生的一系列磁场值;

[0059] 步骤5、将步骤4中获得的一系列磁场值作图,其中,横坐标为通入磁化线圈的连续电流,纵坐标为软磁样品7在铷泡5空间位置产生的磁场,得到n次循环测量的回线,每次回线中纵坐标磁场值为零时对应的横坐标正向电流和负向电流分别为 I_{c+} 和 I_{c-} ;磁化线圈通入 I_{c+} 和 I_{c-} 电流时产生的磁场强度为 $H_{c+}=CI_{c+}/\mu_0$ 和 $H_{c-}=CI_{c-}/\mu_0$,软磁样品矫顽力取值为 $(H_{c+}-H_{c-})/2$,回线偏置为 $(H_{c+}+H_{c-})/2$;

[0060] 其中,若在上述数据处理过程中无法获得 H_{c+} 和 H_{c-} ,则返回步骤1增大本底磁场值,并增加样品室6与铷泡5的间距,然后执行步骤2~5,直至测量出软磁样品7的矫顽力。

[0061] 下面结合实施例一具体说明本发明基于抽运-检测型铷原子磁力仪测量软磁材料矫顽力的方法。

[0062] 实施例一:

[0063] 软磁样品为由宽20mm、长100mm、厚0.1mm的带状1J85坡莫合金带沿长边卷绕成直径小于10mm、长度为20mm的圆筒状样品,测量时样品轴线与磁化线圈8轴线重合,该样品在空间产生的磁场呈轴对称性分布。

[0064] 步骤1、启动抽运-检测型铷原子磁力仪,设置抽运-检测型铷原子磁力仪工作时序,工作周期为100ms,其中抽运光作用时长为30ms,射频场作用时长为0.1ms,原子磁力仪

处于连续工作状态,每秒完成10个工作周期;通过抽运-检测型原子磁力仪输出的磁场值调节通入本底磁场线圈2的电流大小来设定本底磁场大小,使本底磁场设定值在500nT。设定磁屏蔽筒内软磁样品磁化和退磁组件与铷泡5的间距,使磁化线圈8正中心位置与铷泡5的间距为20cm。

[0065] 步骤2、在样品室6中无样品的条件下,用计算机控制6.5位精密电流源9的连续扫描过程:以步长0.03A从1A至0.01A,以步长0.5mA从0.01A至-0.01A,以步长0.03A从-0.01A至-1A,以步长0.03A从-1A至-0.01A,以步长0.5mA从-0.01A至0.01A,以步长0.03A从0.01A至1A,循环测量1次,在此过程中抽运-检测型原子磁力仪测量并记录本底磁场和磁化线圈在铷泡5空间位置产生磁场的代数和;上述测量结果见图3无样品的情况,测量的回线基本重合,偏差小于0.1nT;

[0066] 步骤3、用样品传送杆10将软磁样品7置于磁化线圈8的正中心,再次执行与步骤2中相同的扫描测量过程,循环测量10次,抽运-检测型原子磁力仪测量并记录本底磁场、磁化线圈和软磁样品在铷泡5空间位置产生磁场的代数和;上述测量结果见图3有样品的情况,测量的回线不重合;

[0067] 步骤4、处理步骤2和步骤3获得的测量数据,每个循环中相等电流下用步骤3测得的磁场值减去步骤2测得的磁场值,得到循环测量过程中软磁样品7在铷泡5空间位置产生的一系列磁场值;

[0068] 步骤5、将步骤4中获得的一系列磁场值作图,其中,横坐标为通入磁化线圈的连续电流,纵坐标为软磁样品7在铷泡5空间位置产生的磁场,得到10次循环测量的回线,结果见图4;每次回线中横坐标正半轴或负半轴对应纵坐标磁场值接近零的5个数据点进行线性拟合(2mA的范围被分割为100个点),对应的横坐标正向电流和负向电流分别为 I_{c+} 和 I_{c-} ;磁化线圈通入 I_{c+} 和 I_{c-} 电流时产生的磁场强度为 $H_{c+}=CI_{c+}/\mu_0$ 和 $H_{c-}=CI_{c-}/\mu_0$,软磁样品矫顽力取值为 $(H_{c+}-H_{c-})/2$,10次矫顽力计算结果见图5;回线偏置为 $(H_{c+}+H_{c-})/2$,10次回线偏置计算结果见图6。

[0069] 实施例一中,坡莫合金带软磁样品10次测量的平均值为40.632A/m,与SQUID测量得到的矫顽力42.15A/m偏差3.7%,测量结果再现性以相对标准偏差表示为0.16%。

[0070] 本发明在背景技术中指出,采用国家标准GB/T 13888-2009开磁路可测量软磁材料矫顽力。下面结合实施例二说明,本发明测量软磁材料矫顽力精度和复现性都优于国家标准GB/T 13888-2009开磁路测量方法。

[0071] 实施例二:

[0072] 步骤1、将国家标准GB/T 13888-2009(在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法)文件中图3方法B的实验装置放入图1的磁屏蔽筒1内,该实验装置示意图见图7,本实施例选用单个霍尔探头测量软磁样品的磁场畸变,该霍尔探头测量分辨率为0.0001mT。本底磁场线圈2不通入电流,此时软磁样品周围本底磁场小于100nT。

[0073] 步骤2、采用计算机控制6.5位精密电流源的输出电流连续地磁化或退磁与实施例一中相同的软磁样品,其中磁化电流打开状态持续时间为5秒,之后5秒内保持磁化电流不变采用霍尔探头测量样品漏磁;6.5位精密电流源向磁化线圈输入的电流以0.01A的步长从0.8A逐渐减小至-0.8A,然后再从-0.8A逐渐增加至0.8A,循环测量10次;本实施例采用的磁化线圈的线圈系数为14.75mT/A,采用表达式 $H=CI/\mu_0$ 将磁化电流换算成磁化线圈内产生

的磁场强度。

[0074] 步骤3、以磁化线圈产生的磁场强度为横坐标,以霍尔探头测量样品漏磁为纵坐标作图,见图8(a);图8(b)是将图8(a)中的部分数据放大;将图8(b)中横坐标正半轴或负半轴对应纵坐标磁场值接近零的5个数据点进行线性拟合,对应的横坐标正向电流和负向电流分别为 I_{c+} 和 I_{c-} ;磁化线圈通入 I_{c+} 和 I_{c-} 电流时产生的磁场强度为 $H_{c+}=CI_{c+}/\mu_0$ 和 $H_{c-}=CI_{c-}/\mu_0$,软磁样品矫顽力取值为 $(H_{c+}-H_{c-})/2$,10次矫顽力计算结果见图8(c),10次循环测量的平均矫顽力为38.64A/m,测量再现性以相对标准偏差表示为3.53%;回线偏置为 $(H_{c+}+H_{c-})/2$,10次回线偏置计算结果见图8(d)。

[0075] 综上所述,采用本发明测量装置及方法测量软磁材料矫顽力的精度和复现性要优于采用国家标准GB/T 13888-2009开磁路测量方法,由于本发明采用的抽运-检测型原子磁力仪是绝对磁场测量装置,因此多次循环测量的回线偏置小,漂移小。实施例一仅为本发明的较佳实施例而已,并非用于限定本发明的保护范围。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

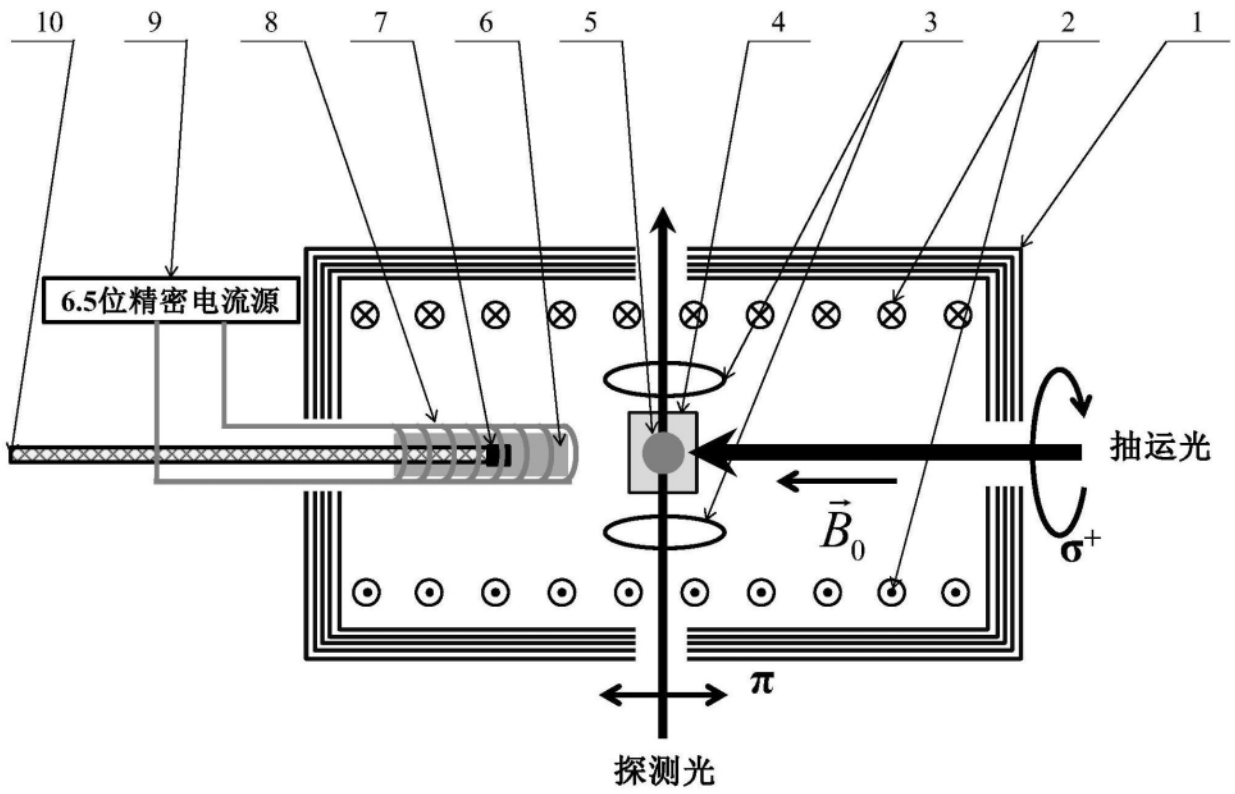


图1

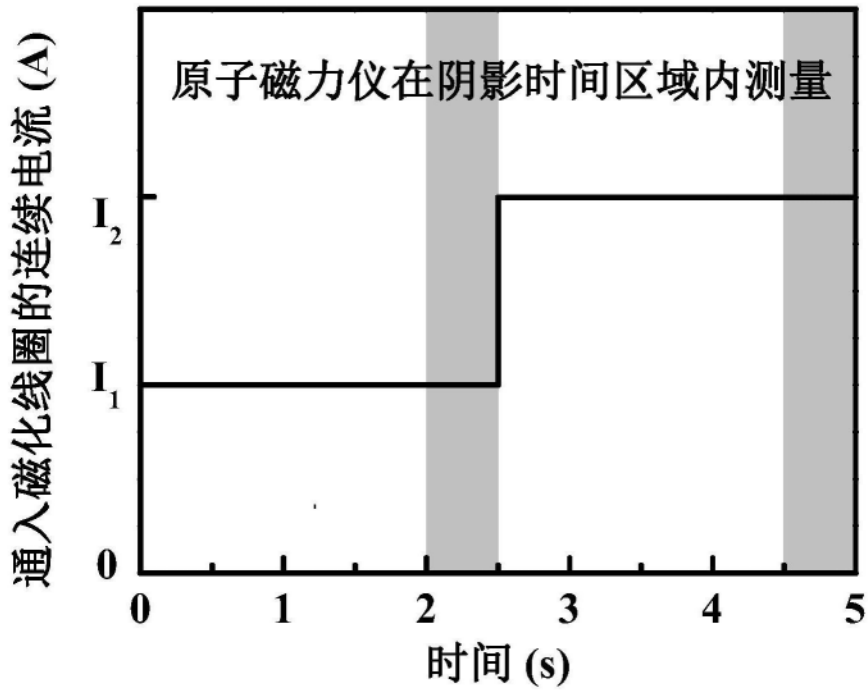


图2

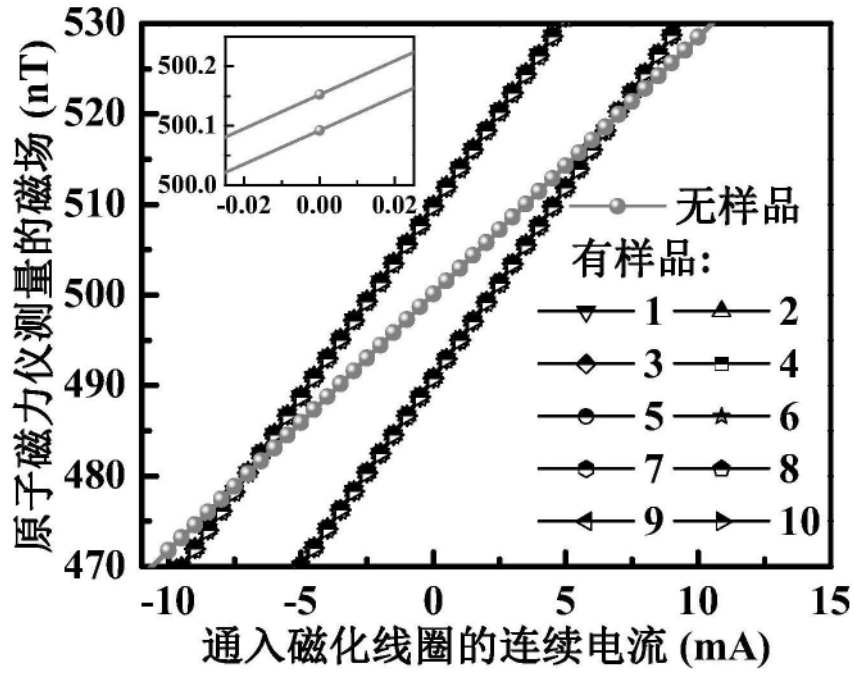


图3

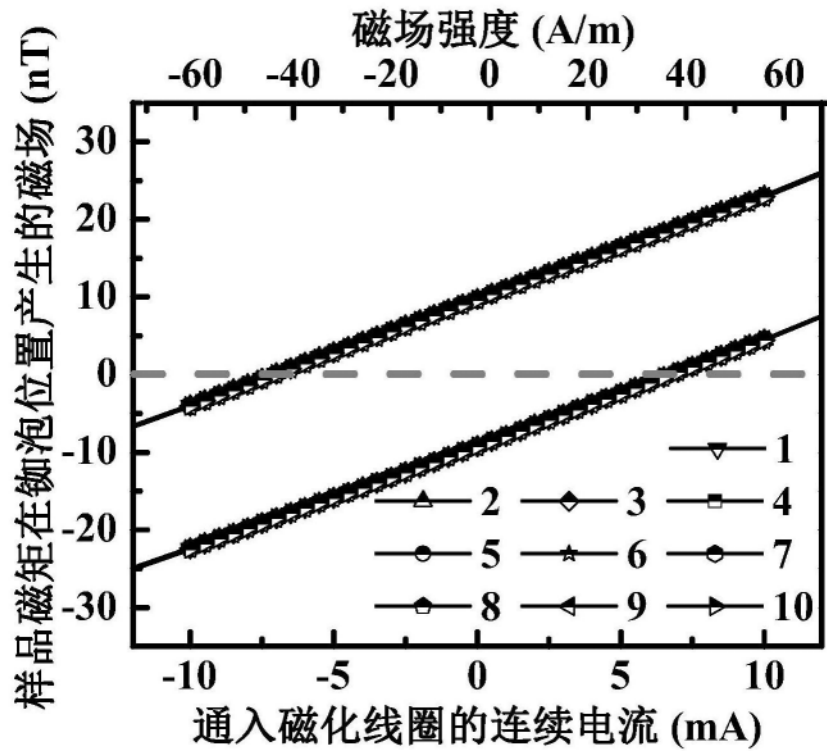


图4

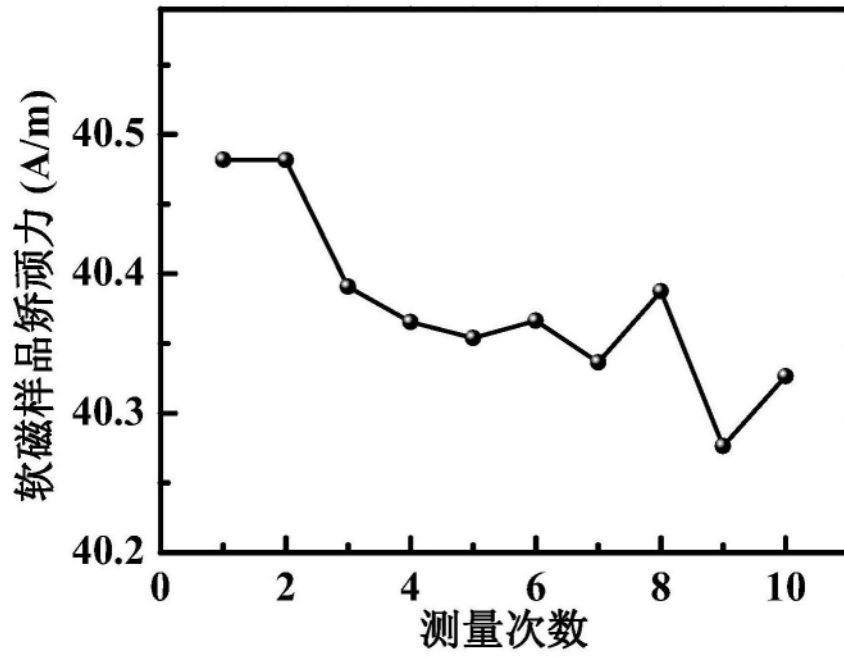


图5

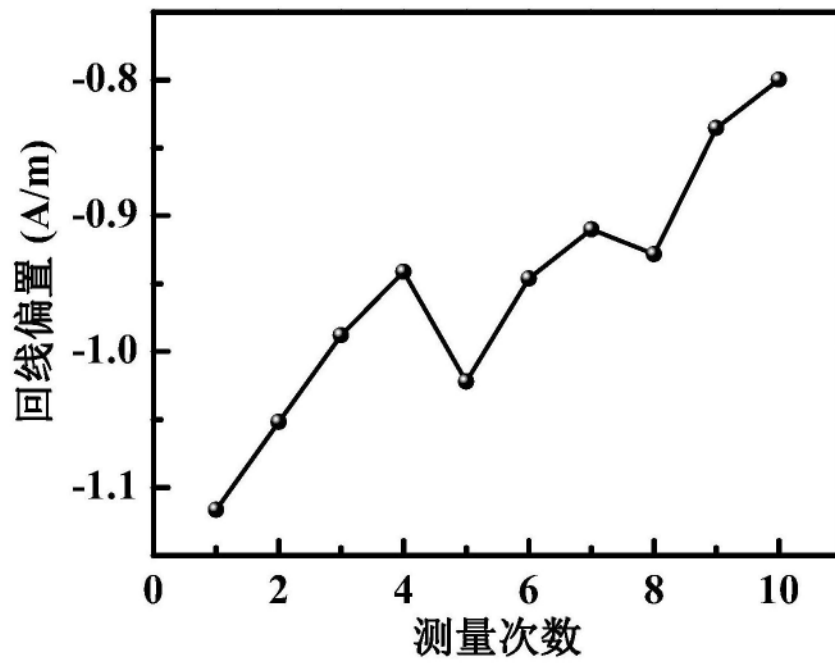


图6

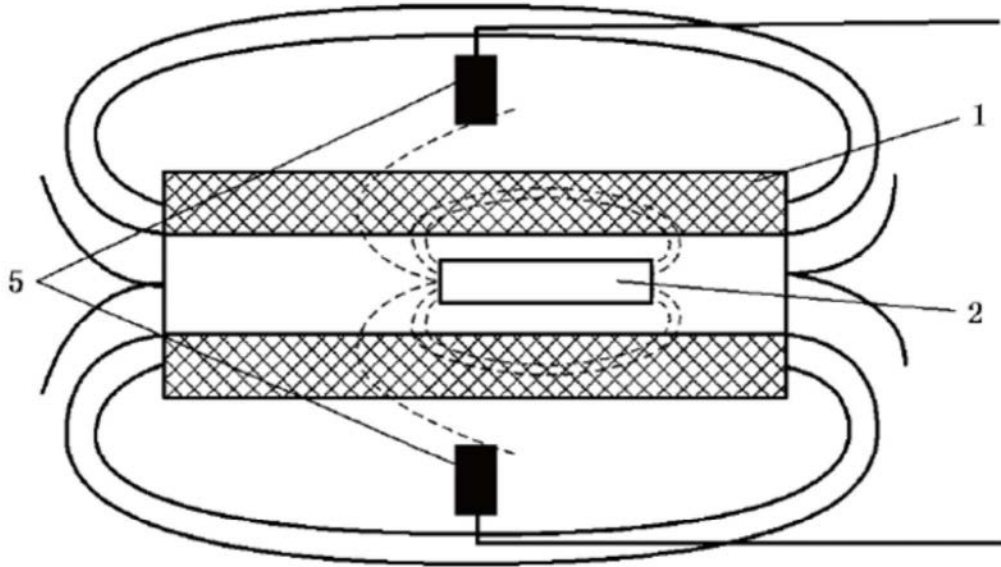


图7

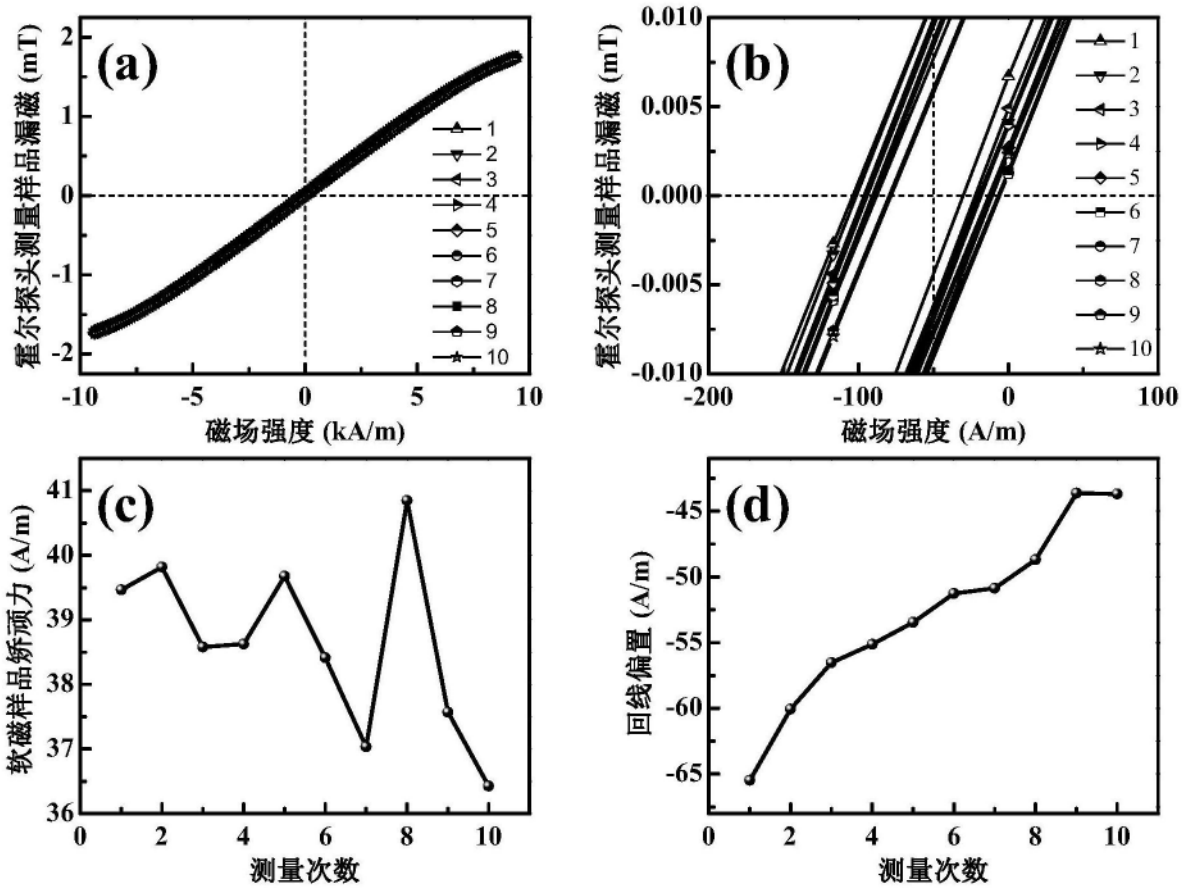


图8

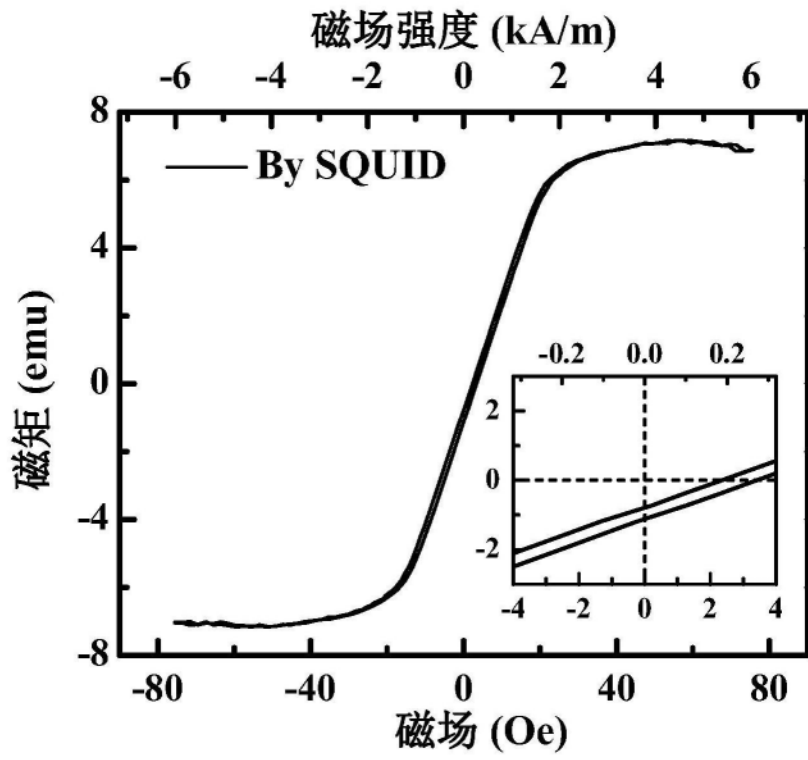


图9