

高场超导磁体剩余磁场对低场磁测量的影响及对策

马麟^{1,2}, 蔚晨菲¹, 王维¹

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124; 2. 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 常用作磁测量的综合物性测量系统中, 为其提供强磁场的超导磁体是非理想的第二类超导体. 人为引入的“缺陷”可以有效提高超导体的磁场耐受性, 使超导磁体能够承载更大的电流并产生更高的磁场. 然而, 高场超导磁体在退磁过程中会产生剩余磁场, 严重影响小磁场条件下的测试结果. 通过理论分析和实际试验, 对比振荡模式和线性模式在磁场归零时对剩余磁场产生的影响, 发现振荡模式可以显著减少剩余磁场, 这有利于在小磁场条件下进行磁性测试.

关键词: 综合物性测量系统; 磁测量; 振动样品磁强计; 剩余磁场

中图分类号: O65; TM937

文献标志码: B

文章编号: 1006-3757(2024)06-0372-07

DOI: 10.16495/j.1006-3757.2024.06.004

CSTR: 32263.14.j.1006-3757.2024.06.004

Effect and Solution of Residual Magnetic Field of High Field Superconducting Magnet on Low Field Magnetic Measurement

MA Lin^{1,2}, YU Chenfei¹, WANG Wei¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Key Laboratory of Advanced Functional Materials, Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: The superconducting magnets that provide the strong magnetic field in physical property measurement system commonly used for magnetic measurements use non-ideal Type II superconductors. The artificially introduced "defects" can effectively improve the tolerance of superconductors to magnetic fields, allowing superconducting magnets to carry more currents and generate higher magnetic fields. However, the superconducting magnets generate residual magnetic fields during demagnetization, which can seriously affect the test results under lower magnetic field conditions. Through theoretical analysis and practical measurement, the effects of Oscillate mode and Linear mode on the residual magnetic fields were compared when the magnetic field was set to zero. It was found that the Oscillate mode significantly reduces the residual magnetic field and facilitates magnetic testing at lower magnetic field conditions.

Key words: physical property measurement system; magnetic measurement; vibrating specimen magnetometer; residual magnetic field

美国 Quantum Design 公司是世界知名的科学仪器制造商之一, 它设计并制造的综合物性测量系统(physical property measurement system, PPMS), 已成为性能最好的低温磁场测试平台之一^[1-2]. 对于

绝大多数常规试验项目, PPMS 已经设计好了具有标准测量功能的硬件和全自动的测量软件, 使用非常方便, 其在磁学、电学和热学等测试中的可靠性和便捷性受到了广大科研人员的认可和支持. 据不

收稿日期: 2024-10-16; 修订日期: 2024-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(面上项目: 52277021) [National Natural Science Foundation of China (General Program: 52277021)]

作者简介: 马麟(1979-), 男, 博士, 高级实验师, 研究方向为新型功能材料, E-mail: malin@bjut.edu.cn

通信作者: 王维(1984-), 女, 博士, 高级实验师, 研究方向为新型功能材料, E-mail: wangwei1984@bjut.edu.cn.

完全统计,现在全世界各大科研机构里约有1500台PPMS在默默为各项科学研究做着贡献,我国拥有的PPMS数量约为全球的六分之一。

PPMS标配的磁学测量选件有振动样品磁强计(vibrating specimen magnetometer, VSM)^[3]、交直流磁强计(AC magnetometer system, ACMS)^[4]和扭矩磁强计(torque magnetometer, TM)^[5]等,其中VSM选件适用范围更广,使用频率也更高。PPMS的VSM选件与传统的VSM有很大不同,它采用专利技术,以平行于磁场方向振动样品的方法进行磁信号采集并处理。而它的背景磁场则由超导磁体提供,可以使超导磁体达到产生磁场的最大值(目前最高可达16 T),并且磁场的均匀性很好。PPMS的VSM选件还具有较大的振幅,可以进一步提高测量的精度。这些优点使得很多科研人员选择PPMS作为磁性样品测量的首选。

笔者使用的PPMS-14LH是2011年出产的湿式系统,拥有浸泡在液氮中的14 T超导磁体,配合外挂式液氮自循环系统。作为一款14 T的高场磁体,能轻松胜任高磁场条件的测试工作。但在日常测试工作中,科研人员对测试条件的要求不尽相同,有在高磁场条件下开展的测试,也有在低磁场条件下测试的需求。在多年的测试工作中发现,使用这样的高场超导磁体进行0.1 T以下甚至是0.01 T以下的低磁场测量时,有时会得不到所需的真实测试曲线。出现类似问题最主要的原因是由超导磁体中的剩余磁场引起的^[6-8],因此在低磁场情况下,尤其是在零场附近,高场超导磁体的剩磁现象带来的影响必须引起重视,否则将会对测试结果产生极大影响,甚至导致测试结果错误。作为测试设备的操作人员,不仅需要熟悉设备的性能、掌握正确的操作,还需要分析问题的原因、开发更多的功能,以便实现设备利用率的最大化,提高测试准确性和工作效率^[6-12]。

1 理论分析

为了研究剩余磁场的起因,需要结合PPMS的工作原理,从高场超导磁体剩磁的产生原因和PPMS变化磁场的工作方式两个方面进行探讨。

1.1 高场超导磁体剩磁的产生原因

根据电流的磁效应,若要磁体产生高磁场,缠绕磁体所用的线圈就必须通过大电流。考虑到电流的需求和体积的限制,这势必就要用到超导材料,

其零电阻的特性可以在承载大电流的同时,减小设备尺寸和大大降低热损耗。根据超导体在磁场中磁化曲线的差异,可将其分为第一类超导体和第二类超导体。与第一类超导体不同的是,第二类超导体存在两个临界磁场:下临界磁场 H_{c1} 和上临界磁场 H_{c2} 。当外加磁场为0,温度下降到超导临界转变温度以下的某个温度 T 时,第二类超导体进入迈斯纳状态即超导态,具有零电阻和完全抗磁性。此时逐渐增加外加磁场,第二类超导体存在三个阶段:

(1)当外加磁场小于 $H_{c1}(T)$ 时,超导体完全排斥磁通线进入,仍旧具有零电阻和完全抗磁性,属于超导态。

(2)当外加磁场介于 $H_{c1}(T)$ 和 $H_{c2}(T)$ 之间时,超导体内部存在的缺陷优先被磁通线穿过,并牢牢将磁通线控制在缺陷范围内,形成“钉扎”效果,此时超导体仍能保持零电阻,但不再具有完全抗磁性,属于混合态。

(3)当外加磁场大于 $H_{c2}(T)$ 时,超导体被磁通线“攻陷”,失去零电阻和抗磁性,转化为正常态。

因此,第二类超导体通常比第一类超导体更耐磁场影响,适用于更高的磁场环境中。对于使用第二类超导体制作的磁体,为了利用其承载的大电流产生更高的磁场,还需要超导体能克服自身产生磁场的影响,即在更高的磁场下仍保持超导体的零电阻特性。研究人员会通过各种方法向超导体内引入尽可能多的“缺陷”,以此来提高超导体整体的“钉扎力”,进而提高超导体耐受磁场的能力,使其承载产生更高磁场的大电流而不会发生失超。当第二类超导体中存在高密度缺陷时,就被称为非理想状态第二类超导体,制作PPMS高场磁体所使用的超导体正是属于这种材料。

由于超导磁体内部存在各种引入缺陷,虽然可以获得更高的应用磁场,但在磁体充磁和退磁过程中宏观上则会呈现出不可逆的特性。与上述第二类超导体受外加磁场影响存在不同阶段类似,缺陷在外加磁场变化过程中也存在不同的阶段:

(1)当超导体在 T 温度下零场进入超导态,伴随外加磁场的增加,但并未超过 $H_{c1}(T)$ 时,超导体均处于迈斯纳态,此时缺陷没有捕获磁通线。

(2)当外加磁场大于 $H_{c1}(T)$ 时,磁通线穿过超导体,但是缺陷会将磁通线钉扎在一起,形成钉扎中

心, 不过它也会对磁通线的穿透造成阻力, 直到外加磁场到达 $H_{c2}(T)$.

(3) 当外加磁场超过 $H_{c2}(T)$ 时, 缺陷捕捉磁通线达到饱和, 磁化完成, 磁通线完全通过超导体, 出现失超.

(4) 当外加磁场从 $H_{c2}(T)$ 开始下降时, 被缺陷钉扎住的磁通线数量减少, 而缺陷同样也会阻碍磁通线的排出, 使得磁化曲线上出现磁滞现象.

(5) 当外加磁场降为零时, 缺陷中还会有少量未完全排出的磁通线存在, 这会造成零磁场时存在剩余磁矩的现象, 称为“俘获磁通”, 表现为存在剩余磁场, 简称“剩磁”.

每个缺陷都可能会存在少量未完全排出的磁通线, 而整个超导体中人工引入缺陷的数量很多, 这些缺陷未排出的磁通线总量不容忽视. 图 1 是 Quantum Design 公司给出的使用 9、14 和 16 T 三种磁体的 PPMS 在不同磁场下的磁场误差 (application note 1 070-207), 从图中可以看出, 伴随着磁体产生磁场能力的提高, 其在零场下存在的磁场误差也相应提高. 比如在零场下, 9 T 磁体的磁场误差在 0.002 T 以内, 14 T 磁体在 0.01~0.02 T 之间, 而 16 T 磁体则超过了 0.02 T. 显而易见, 磁体支持的磁场越大, 其磁体线圈中的缺陷数量就越多, 导致在零场下的误差也就会越大.

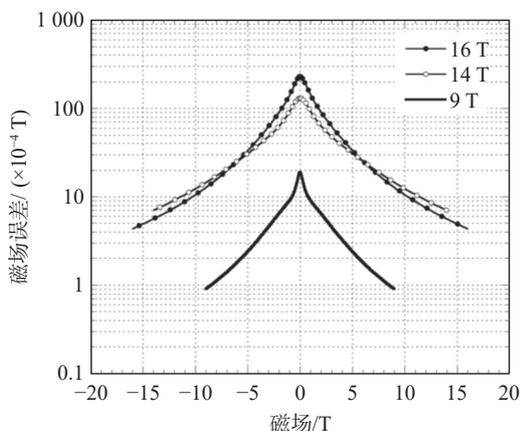


图 1 三种磁体在不同磁场下的磁场误差

Fig. 1 Magnetic field errors of three magnets under different applied magnetic fields

对于 PPMS 的控制软件 MultiVu 而言, 其在工作时对样品位置磁场强度的表征(即软件中显示的磁场数值)是根据超导磁体缠绕线圈中的电流大小计算获得, 并非利用磁强计对测量位置进行直接测

量. 当线圈中的电流降为 0 时, 其显示的磁场大小就是 0, 并没有考虑超导磁体中缺陷处的剩磁对样品位置的影响, 因此超导磁体仍会在样品位置产生一定强度的剩余磁场, 使得软件显示出的磁场强度和实际磁场强度存在差异. 这也是为什么超导磁体支持的磁场越大, 其在零场下的剩磁也就会越大的原因.

1.2 PPMS 变化磁场的工作方式

PPMS 设备厂商在设计软硬件的时候已经注意到了这个问题, 因此为磁体的变化磁场操作设计了不同的工作方式. (注: 虽然厂商也开发出了超低场选件, 支持将剩余磁场降低至 5×10^{-5} T 甚至更低, 但是需要单独购买, 而且价格不菲, 更重要的是并非适配所有型号的 PPMS, 配置率相对较低, 因此不纳入本文讨论的范围, 本文仅以标配的 PPMS 为例.) MultiVu 软件中提供的变化磁场操作通常有以下三种工作方式:

(1) Linear 模式. Linear 模式称为线性模式, 是最常用的变场模式, 通过直接调整磁体线圈中的电流, 使样品位置的磁场快速达到设定值. 通常情况下, 在即将达到设定值时, 软件控制磁场变化开始减速, 但会出现一定的过冲, 然后软件会在设定值附近进行反复微调, 直至达到设备默认的误差范围内停止调整, 保持稳定.

(2) No Overshoot 模式. No Overshoot 模式也称为防过冲模式, 其是在磁场当前值和设定值差额大约 70% 的位置开始, 逐渐逼近设定值, 直至达到设备默认的误差范围内停止变化, 但不会超过设定值. 它比 Linear 模式要慢一些, 但是对某些具有磁滞特性的样品友好, 可以减少对样品的影响, 保证测试结果的准确性.

(3) Oscillate 模式. Oscillate 模式也称为振荡模式, 其通过充磁和退磁在设定磁场的两侧多次振荡, 逐渐变化磁场并往复逼近设定值. 该模式可以在磁场归零时尽可能减少超导磁体线圈中缺陷钉扎的磁通线数量, 以获得最小化的剩余磁场, 即获得和软件显示数值相对接近的磁场, 但比前述两种模式要花费更多的时间.

几种变场模式都具有自己的特点和适用范围, 在测试过程中需要根据测试的需要选择最恰当的模式, 可以在提高工作效率的同时, 使测试结果更加准确.

2 对比试验

通过上述分析可以看出, 高场超导磁体的剩磁是本征的、不可避免的, 但是通过 MultiVu 软件的操作, 采用 Oscillate 模式变场可以对低场下超导磁体的剩磁情况有所改善. 下面将对 Oscillate 模式的工作情况进行具体分析, 并与 Linear 模式进行对比, 评判其改善的效果.

Oscillate 模式的磁场振荡归零过程, 因初始磁场的大小而异(如图 2 所示). 当磁场大于 1.0 T 时设置振荡归零, 系统会统一将磁场先降到 1.0 T 而后再以此为基准进行振荡, 振荡幅度逐渐减小, 下次的振荡幅度约为上次的 70%, 如 1.0、-0.7、0.5、-0.35、0.25 T 等, 直到幅度达到±0.02 T 附近就会直接归零, 如图 2(a)中插图所示. 而当磁场小于 1.0 T 时设置振荡归零, 系统则是以初始磁场大小为基准进行振荡, 振荡幅度也保持为上次的 70%, 如初始磁场为 0.8 T, 则后续分别为 -0.56、0.39、-0.27、0.19 T 等, 直到幅度达到±0.02 T 附近再直接归零[图 2(b)]. 负场起始的振荡归零的情况与此类似, 不再赘述.

为了对比 Oscillate 模式和 Linear 模式的归零效果, 验证试验设计如下: 在室温 300 K 条件下, 将 VSM 选件中自带的金属 Pd 标准样品定好中心后, 利用 Oscillate 模式和 Linear 模式分别设定从不同的初始磁场进行归零操作. 在 MultiVu 软件系统完成磁场归零操作并进入稳定模式(persistent)后, 利

用 Pd 标准样品对实际磁场进行持续测量, 采集数据时长为 60 s, 每秒取点, 再将获得的数据取平均值后记为对应的磁矩值(单位: $A \cdot m^2$), 通过公式(1)计算得到样品位置的真实磁场强度.

$$H=M/(\chi \cdot m) \quad (1)$$

式中: H 为样品位置的真实磁场强度(计算获得, 单位: T), M 为测试样品在外加磁场下的磁矩(测试结果, 单位: $A \cdot m^2$), χ 为 Pd 标准样品的磁化率[常数, $0.0525 A \cdot m^2/(T \cdot kg)$], m 为 Pd 标准样品的质量(单位: kg).

试验设置的初始磁场大小为 0.1~1.0 T(间隔 0.1 T)以及 1.0~14.0 T(间隔 1.0 T), 通过两种归零模式获得的磁矩值、计算得到的磁场强度以及 MultiVu 软件显示的磁场强度如表 1 所列, 方便进行对比.

由表 1 可以看出, 通过磁场归零操作后, 两种模式下的 MultiVu 软件显示的磁场强度均在 0 附近, 可以认定为磁场归零操作已经完成. 但从右侧的 Linear 模式磁场归零数据可以看出, 在初始磁场为 14.0~1.0 T 时, 正场线性归零后, 实测的真实磁场强度(即剩磁)均在 -0.012 T 附近, 这与 Quantum Design 公司官方表述一致, 并未因为初始磁场的不同而出现很大差异. 而当初始磁场降到 1.0 T 以下后, 剩磁虽然也都是负值, 但随着初始磁场的降低而逐渐减小, 基本降至 -0.004 T 附近, 这说明 1.0 T 以下较小的初始磁场在归零时产生的剩磁影响也会较小. 相应地, 左侧的 Oscillate 模式磁场归零数据则显示出与右侧完全不同的情况. 在初始磁场同

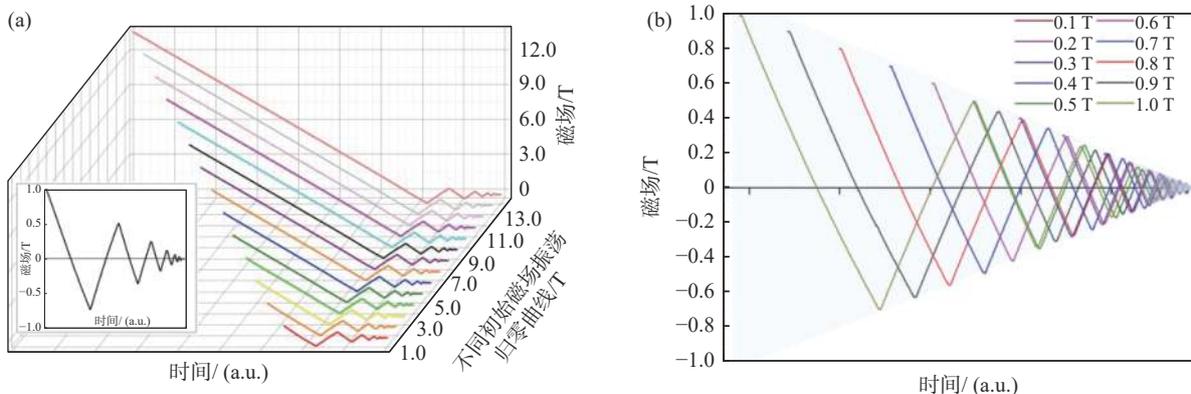


图 2 Oscillate 归零模式的磁场变化曲线

(a) 初始磁场为 1.0~14.0 T(内插图为 1.0 T 的放大图), (b) 初始磁场为 0.1~1.0 T

Fig. 2 Curves of magnetic field changed to zero by Oscillate mode

(a) initial magnetic field of 1.0~14.0 T (inset: large version of 1.0 T), (b) initial magnetic field of 0.1~1.0 T

表 1 两种模式磁场归零后实际磁场与 MultiVu 软件显示磁场的对比

Table 1 Comparison of actual magnetic field with magnetic field displayed by MultiVu software after magnetic field changed to zero by two different modes

初始磁场/T	Oscillate归零模式			Linear归零模式		
	标样测得 平均磁矩 /($\times 10^{-9}$ A·m ²)	计算获得 磁场强度 /($\times 10^{-4}$ T)	软件显示 磁场强度 /($\times 10^{-4}$ T)	标样测得 平均磁矩 /($\times 10^{-9}$ A·m ²)	计算获得 磁场强度 /($\times 10^{-4}$ T)	软件显示 磁场强度 /($\times 10^{-4}$ T)
14.0	9.199 1	6.330 2	0.10	-176.45	-121.42	-0.11
13.0	-3.422 3	-2.355 0	0.17	-176.97	-121.78	-0.25
12.0	7.267 4	5.001 0	0.16	-182.97	-125.91	0.02
11.0	-0.424 21	-0.291 91	-0.06	-181.02	-124.57	-0.25
10.0	1.767 9	1.216 6	0.17	-178.19	-122.62	-0.09
9.0	0.525 36	0.361 52	0.02	-180.09	-123.93	0.11
8.0	8.585 6	5.908 1	0.11	-176.18	-121.24	0.12
7.0	-0.590 89	-0.406 61	0.05	-185.93	-127.95	-0.06
6.0	-0.592 14	-0.407 47	0.17	-184.44	-126.92	-0.13
5.0	-4.599 3	-3.164 9	-0.01	-175.90	-121.04	-0.12
4.0	0.675 42	0.464 78	0.02	-184.29	-126.82	0.09
3.0	-2.430 0	-1.672 2	0.06	-181.82	-125.12	-0.13
2.0	-6.595 4	-4.538 5	-0.04	-183.08	-125.98	-0.06
1.0	-11.050	-7.603 9	-0.01	-186.08	-128.05	0.16
0.9	-23.841	-16.406	0.01	-149.92	-103.17	0.18
0.8	-34.369	-23.651	0.02	-126.31	-86.919	-0.14
0.7	-46.022	-31.669	0.07	-103.85	-71.463	-0.01
0.6	-54.173	-37.278	-0.08	-86.688	-59.653	-0.10
0.5	-55.686	-38.320	-0.01	-76.877	-52.902	0.10
0.4	-58.550	-40.290	0.06	-68.642	-47.235	0.02
0.3	-61.255	-42.152	0.09	-61.046	-42.008	-0.06
0.2	-59.609	-41.019	0.14	-57.191	-39.355	-0.05
0.1	-59.478	-40.929	0.20	-55.226	-38.003	-0.16

为 14.0~1.0 T 时, 正场线性归零后, 剩磁要比 Linear 模式小很多, 基本都在 ± 0.001 T 之间, 也与初始磁场的大小无关. 但当初始磁场降到 1.0 T 以下后, 剩磁则都变成负值, 并且随着初始磁场的降低而出现升高的情况, 最后也升至 -0.004 T 附近, 这说明越小的初始磁场, 其振荡归零降低剩磁的效果越差. 将两种归零模式的磁场归零效果放在图中会更加直观, 如图 3 所示, Oscillate 模式的归零剩磁明显

要比 Linear 模式小很多, 只是在初始磁场小于 1.0 T 时才开始逐渐变大, 但变大的效果仍旧比后者更加理想.

试验也对初始磁场为负场的情况进行了分析, 情况与正场类似, 反之亦反.

试验还利用实测样品进行了验证. 实测样品为某薄膜材料, 具有不到 0.001 T 的较小矫顽力, 为了测到完整的 MH 曲线, 客户要求 ± 0.01 T 间以

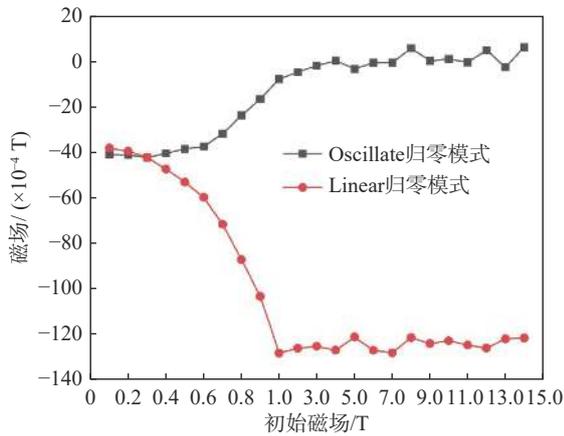


图 3 不同初始磁场归零后 Oscillate 和 Linear 两种模式下剩余磁场的对比

Fig. 3 Comparison of residual magnetic fields in Oscillate and Linear modes after magnetic field changed to zero with different initial magnetic fields

0.000 2 T 步长进行测试. 测试采用逐点停止 (driven) 模式进行, 可以避免扫场测试带来的曲线平移. 测试前如果采用 Oscillate 模式将磁场归零, 可以获得如图 4(a) 所示的测试曲线. 仔细观察可以发现, 曲线与纵坐标 0 轴的两个交点间的中点, 较原点 (0, 0) 向右移动了不到 0.001 T, 这与理论上中点应该和原点重合有异, 说明此次磁场归零后依旧还存在负的 0.001 T 的剩场, 后续只需将曲线进行平移修正即可得到正确的 MH 曲线. 而测试前如果采用 Linear 模式进行磁场归零, 就必须把测试的磁场范围加大, 才能得到如图 4(b) 所示的测试曲线. 两个 MH 曲线的线型基本一致, 但后者曲线的中点较原点向右移动了约 0.01 T, 说明磁场归零的操作存在较大的负的剩场, 如果还是按照客户要求仅测 ± 0.01 T 间的数据, 则无法得到正确的测试曲线.

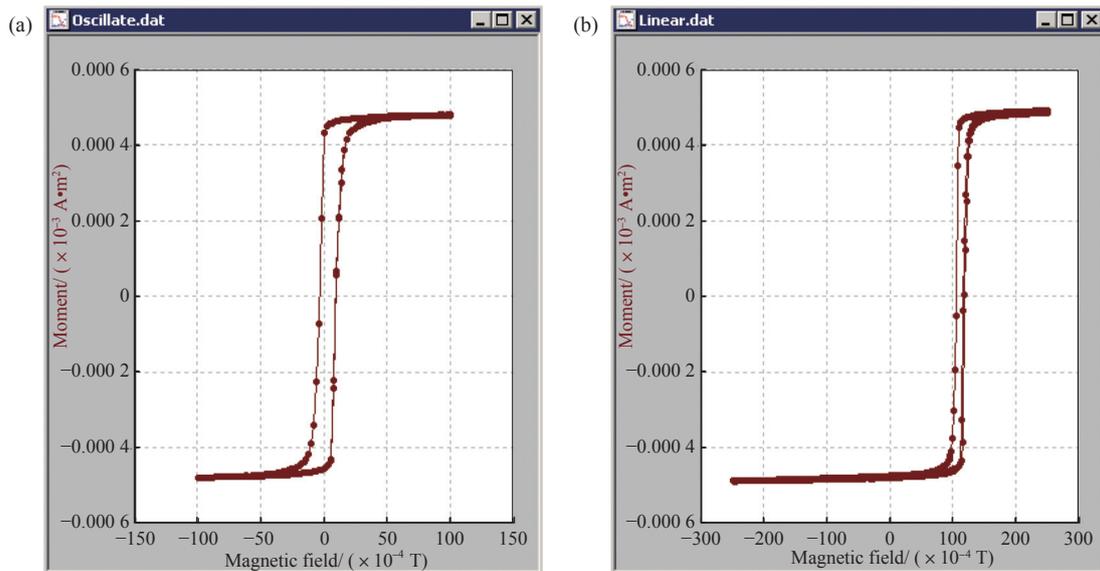


图 4 两种模式磁场归零后实测样品的 MH 曲线
(a) Oscillate 模式, (b) Linear 模式

Fig. 4 MH curves of measured sample after magnetic field changed to zero by two different modes
(a) Oscillate mode, (b) Linear mode

3 总结

PPMS 系统中使用的高场超导磁体由于其本征特性存在很多人工引入的“缺陷”, 即“钉扎中心”, 它们的存在使得超导磁体在磁场归零时仍旧会存在剩余磁场, 这会对低场测试造成干扰. MultiVu 操作软件中的 Oscillate 变场模式可以有效

降低剩余磁场, 对于 14.0 T 的超导磁体可以从 -0.012 T 降低到 0.001 T 以下, 降低一个数量级. 如果希望得到较小的剩余磁场, 需要在 1.0 T 及以上的初始磁场进行 Oscillate 模式磁场归零, 太高的初始磁场并不会明显改善, 只会增加磁场归零所花费的时间, 而低于 1.0 T 的初始磁场进行 Oscillate 模式磁场归零, 降低剩余磁场的效果并不明显.

参考文献:

- [1] Quantum Design—综合物性测量系统—PPMS[Z/OL]. [2024-10-14]. <https://www.qd-china.com/zh/pro/detail/1912091480804/1909260926498>.
- [2] 张焱, 高政祥, 高进, 等. 物理性质测量系统 (PPMS) 的原理及其应用 [J]. 现代仪器, 2004, 10(5): 44-47. [ZHANG Yan, GAO Zhengxiang, GAO Jin, et al. Principle and applications of PPMS system[J]. Modern Instruments & Medical Treatment, 2004, 10(5): 44-47.]
- [3] Quantum Design—PPMS-VSM 振动样品磁强计 [Z/OL]. [2024-10-14]. <https://qd-china.com/zh/pro/detail/1912161132946>.
- [4] Quantum Design—PPMS 系统交直流磁强计 (ACMS) [Z/OL]. [2024-10-14]. <https://qd-china.com/zh/pro/detail/1912161155546>.
- [5] Quantum Design—PPMS 系统扭矩磁强计 [Z/OL]. [2024-10-14]. <https://qd-china.com/zh/pro/detail/1912161176216>.
- [6] 苏少奎. 低温物性及测量: 一个实验技术人员的理解和经验总结 [M]. 北京: 科学出版社, 2019. [SU Shaokui. Low temperature physical properties and measurement: an experimental technician's understanding and experience summary[M]. Beijing: Science Press, 2019.]
- [7] 于红云. SQUID-VSM 磁性测量误差研究 [J]. 实验技术与管理, 2015, 32(1): 61-64. [YU Hongyun. Study on magnetic measurement error of SQUID-VSM[J]. Experimental Technology and Management, 2015, 32(1): 61-64.]
- [8] 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. [YU Hongyun. Effect of superconducting magnet remanence on the soft magnetic material measurements[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(4): 047502.]
- [9] 马麟, 王维. 综合物性测量系统数据记录程序对磁测量影响的研究 [J]. 分析测试技术与仪器, 2024, 30(4): 260-265. [MA Lin, WANG Wei. Effect of data logger of physical property measurement system on magnetic measurement[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 2024, 30(4): 260-265.]
- [10] 马麟, 王朔, 王维. 综合物性测量系统振动样品磁强计测量定中心问题的探究 [J]. 分析测试技术与仪器, 2023, 29(2): 191-196. [MA Lin, WANG Shuo, WANG Wei. Study on locating sample in vibrating specimen magnetometer measurement by physical property measurement system[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 2023, 29(2): 191-196.]
- [11] 毕四军, 李喜玲. 磁学测量系统的功能扩充 [J]. 分析测试技术与仪器, 2021, 27(1): 44-49. [BI Sijun, LI Xiling. Expanded function of magnetic property measurement system (SQUID)[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 2021, 27(1): 44-49.]
- [12] 王峰. 物性测量系统的功能扩展 [J]. 硅谷, 2012, 5(18): 33, 18. [WANG Feng. Function expansion of physical property measurement system[J]. Silicon Valley, 2012, 5(18): 33, 18.]