

脉冲强磁场

高瑞芬 朱泽智 陈兆甲

(中国科学技术大学)

一、引言

一般铁芯磁体要做到具有厘米量级的工作空间,其最高磁场约为 3 T 左右。如果采用圆锥形极靴把磁力线加以集中来提高场强的话,则当极靴根部直径比端部直径大 10 倍时,极靴间隙中的场强也仅能增加 1.5 T^[1]。所以想以增大极靴根部直径和端部直径的比值进一步提高铁芯磁体的场强,将在制作、电力供应及冷却等方面遇到很大困难。至今尚未有用铁芯磁体在厘米级工作空间获得 10 T 量级的磁场的。

本世纪六十年代以来,实用超导线材虽然获得迅速发展,但迄今超导磁体的最高场强也仅达 17.5 T。它是用 Nb₃Sn 和 V₃Ga 超导导线绕制的混合磁体^[2]。有人用常规线圈和超导线圈组合成混合磁体,用这种方法获得的场强至今还没有超过 25 T。所以要得到高于 25 T 的场强仍应求助于常规空心线圈。当然,它也有一定困难。如美国麻省理工学院 F. Bitter 国家磁体研究室,用 10 MW 的电源在直径 3.2 cm 的空间得到 22.5 T 的恒定磁场。这种形式的磁体所需电源设备庞大,且绝大部分电能以焦耳热形式消耗于线圈。为移去这些焦耳热,需要非常大的冷却水设备(每分钟大约要 10,000 升冷却水),否则铜线发热,电阻值逐渐增大,结果使更多的电能消耗于焦耳热,而磁场强度将因此严重下降,甚至线圈会烧融破坏。

为了避免上述恒定磁场所遇到的困难,人们采用了脉冲形式的磁体,即用一组电容器(或其它直流电源如直流发电机、蓄电池),突然向

常规空心线圈放电,形成强大的脉冲电流,从而在线圈中获得脉冲强磁场。这既不需要大功率的直流电源,又由于场的持续时间短,不会产生过分的焦耳热,因而冷却问题也容易解决。况且在许多物理研究中并不一定需要恒定磁场,往往脉冲磁场就适用了,如测量超导材料的 J_c-H 特性。有人认为只要脉冲磁场的上升时间大于 10 ms,无论是化合物或合金超导材料,其测量结果与恒定磁场中得到的结果是一致的^[3]。又如在研究强场下的磁致电阻效应、霍尔效应和磁光效应等等的工作中,可以用磁场上升时间更短的脉冲磁场。

然而,用空心线圈得到 30 T 以上的场强,无论是恒定场或脉冲场,都有一个共同的严重困难,即在磁体中存在强大的电磁力(Lorentz 力)。

二、磁体结构

磁体内孔径和高度是根据实验需要和可能选择的。磁体孔径越大,则获得的实验空间也越大;磁体高度越高,则场的均匀度越好。但在一定的电源功率之下,场强随孔径和高度的增加而降低,所以我们根据现有的电源,制作了内径为 25 mm,高度为 80 mm 的磁体线圈。磁体总体的截面示于图 1。本磁体线圈的铜线是截面为 $2.7 \times 1.1 \text{ mm}^2$ 的聚酯亚胺漆包扁铜线。

在磁体结构方面主要考虑磁体受力问题。在磁体线圈中产生的电磁力,沿径向方向是向外的膨胀力,而沿轴向是向中心的压缩力。本磁体在电流为 3.7 kA 时产生 30 T 的场强,此时铜线受到的张力高达 60 kg/mm^2 ,已经远远超

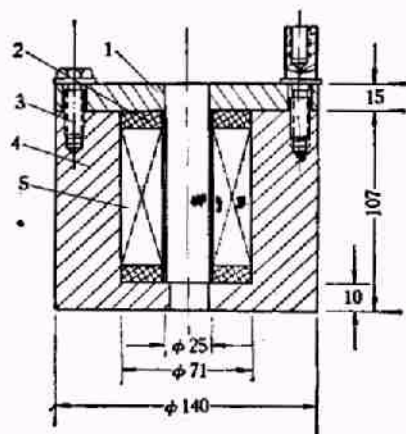


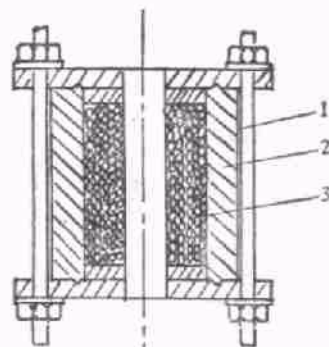
图1 脉冲磁体的截面图

1. 不锈钢加固盖; 2. 酚醛玻璃纤维层压板; 3. 紧固螺栓; 4. 不锈钢加固套筒; 5. 磁体线圈

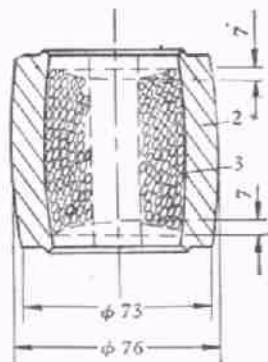
过铜的拉伸强度(液氮温度下 $\sim 36\text{kg/mm}^2$)^[4]。要使磁体线圈不致造成永久性形变或崩溃,决不能依靠线圈的自支撑,为此我们采用不锈钢制的高强度套筒加固。套筒壁厚35mm,套筒的一端有15mm厚的不锈钢板,用八个M10的螺栓夹紧,使线圈得到轴向预压缩,并使线圈内结构更紧凑。

此外,在线圈层间加0.06mm厚的聚酯薄膜、电容器纸,并灌变压器油作填充。变压器油在低温下凝固,可以防止线圈在强电磁力作用下匝间产生相对运动,也即起了增强线圈的作用,同时保证了层间具有良好的电绝缘性能。在线圈的上、下和周围都用酚醛玻璃纤维层压板包围着,以免与不锈钢套筒短路。

图2(a)是一个两端压缩不紧、螺栓强度不够、填充不佳的磁体。不锈钢加固套筒壁厚是15mm,中心管用壁厚0.2mm、直径25mm的德银管,线圈由双股线径为1.2mm的漆包圆截面铜线绕成。在励磁到31T时,套筒的两个端盖被顶开、三个螺栓被拉断、中心管破裂。磁体破坏后的截面大致如图2(b)所示。线圈受径向膨胀力和轴向压缩力作用的结果,它的端面形成凹形,凹形深度达7mm,不锈钢套筒中央部分外直径膨大了3mm。可见,要使磁场强度超过30T,不锈钢套筒壁厚15mm是不够的。这



(a) 破坏前



(b) 破坏后

图2 磁体在破坏前后的情况

1. 螺栓; 2. 不锈钢加固套筒; 3. 线圈

与理论估计值符合。所用估算公式如下:

$$t = \frac{pa_1}{\sigma}$$

此处 t 是套筒壁厚; p 是电磁力产生的径向压强; a_1 是线圈内半径; σ 是不锈钢屈服强度。

三、实验装置及电路

磁体的安装见图3。在磁体中心插了带尾巴不锈钢液氮杜瓦瓶。磁体的引线与不锈钢支架的电绝缘必须充分注意,实验过程中经常用摇表检查。实验电路见图4。电容器组由50个脉冲电容器并联组成。每个电容器电容值为 $150\mu\text{f}$,耐压为5kV,总贮能量有100kJ。

380V的三相电经升压、整流后向电容器组充电。充电电压由 $50\mu\text{A}$ 电流表读出。电容器向磁体放电时的电流高达几千安培,所以采用

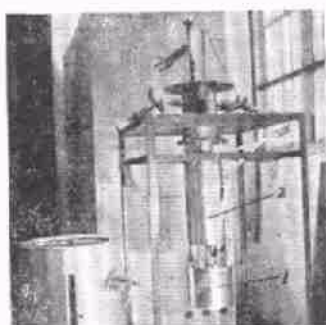


图3 磁体安装图

1.磁体 2.不锈钢液氮杜瓦瓶

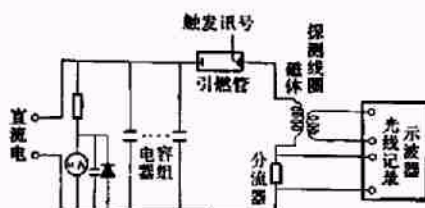


图4 实验电路

引燃管作高电压、大电流开关。引燃管由触发器触发而导通。用光线记录示波器作记录。为了观测磁体中流过的电流值，磁体上串联一个100 A/75 mV的分流器。分流器上的电压输出由光线记录示波器记录。

磁场强度用探测线圈测量。探测线圈上的感应电压经积分器积分后，也输入示波器记录下来。探测线圈和积分器系统预先在标准磁场中经过标定。其它被测物理量电信号也可输入同一示波器上，同时记录。

四、实验结果和讨论

本磁体在3.6 kV电压下励磁，得到30.2 T的场强。脉冲上升时间为9.9 ms。

我们将磁体分别置于液氮中和室温下，用同样的电容器电压（~1 kV）励磁，实验记录示于图5。图5(a)是液氮温度下磁体电流，图5(b)是室温下磁体电流。从图中可以清楚看到，液氮温度下的脉冲峰电流比室温峰电流高~44%。

磁体由电容器组励磁时，得到的脉冲电流

物理

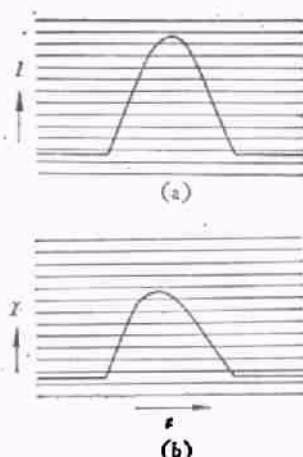


图5 励磁电压为1 kV时的电流脉冲（坐标I和t分别表示电流及时间）

(a) 磁体在液氮温度；(b) 磁体在室温

峰值由下式决定：

$$I_{\max} = \frac{V}{L\omega_d} \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\omega_d} \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\mu}\right)\right] \sin \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\mu}$$

其中

$$\omega_d = \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\mu = \frac{R}{2L}$$

上式中V是励磁电压，以V为单位；L是磁体线圈的电感值，以H为单位；R是线圈电阻值，以Ω为单位；C是电容器组总电容值，以f为单位。

由上式可见，线圈电阻R越大，则μ越大，峰电流I_{max}将越小，这是由于电能消耗于焦耳热所致。铜线的电阻在液氮温度下要比室温下小7倍左右，所以把磁体放在液氮中使用是很有利的。以励磁电压1 kV为例，在室温和液氮下运行、理论计算得到的相应磁场强度分别是5.7 T和8.3 T，即在液氮下运行磁场可提高46%。上述实验结果与这计算结果相当一致。

实验中测量了励磁电压V与磁体电流I的关系（见图6）。I-V的关系近似于线性。在高电压时，实验线略向下弯，这是由于电流大的情形下线圈电阻变大的缘故。如果在高场（大于20 T）时，在一个脉冲之后没有充分冷却就紧接着励磁的话，是不能获得预期的电流值的，如图6中标有箭头的实验点。一般高场情况下，

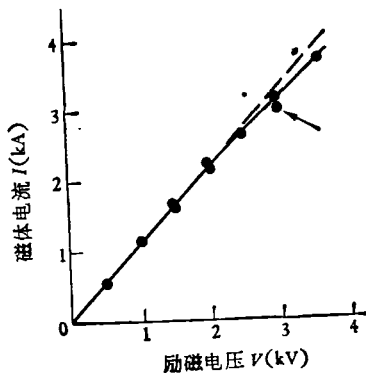


图6 磁体中 $I-V$ 关系

两次励磁的间隔需 30 分钟左右。当线圈基恢复到液氮温度时，示波器记录的脉冲电流是半正弦形状，如图 5(a)。反之，如果记录的脉冲形状在下降时比正弦形状平坦或甚至拖着一个大“尾巴”[如图 5(b) 的形状]，则说明绕组温度太高，这或者是由于冷却不充分，或者是因为所选用的线圈铜线太细。

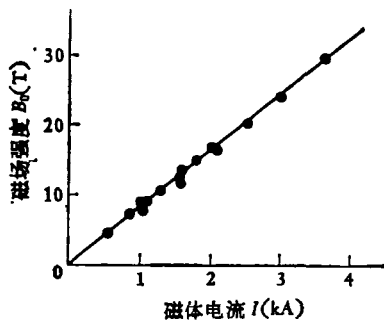


图7 磁体的 B_0-I 关系

实验还观察了磁场强度 B_0 与磁体电流 I 的关系，它也是线性的（见图 7）。这说明我们在磁体上所采用的绕制工艺、填充及套筒加固等，在 30T 以下对防止线圈变形是有效的。但本磁体经过数次连续高场后，线圈发生形变而短路，因此要制造 30T 以上的磁体，需要进一步研究绕制工艺及填充。

在实验过程中，我们及时测量线圈的电感值，发现电感值能够很灵敏地反映线圈的形变。当磁体线圈没有填充或填充不佳时，即使场强小于 20 T，经励磁后感电也会变大（ $< 6\%$ ），但经过几分钟，电感可以完全恢复到原来值，说明此时线圈还仅处在弹性形变范围之内。但当

场强超过 20T 时，除了电感变化值增大外，电感值不再恢复到原来值，说明此时已造成范性形变。如果加高场后，电感值的变化突然很大（往往电感值变小），同时电流或磁场脉冲波形发生畸变（见图 8，它是磁场波形。磁场波形畸变比电流波形畸变明显得多），则预示了磁体内部短路、有破坏的危险。

以上各项实验观察和讨论是我们今后获得更高磁场的基础。

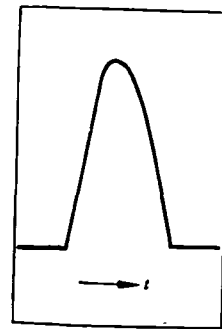


图8 磁场波形畸变，预示磁体将要破坏

我们还利用这个磁体，通过四引线电阻法测量了 NbTi 超导线的临界磁场 $H_c(4.2K)$ 。用示波器记录，示于图 9。图中 A 线为脉冲磁场信号；B 线是在脉冲场中超导线上电压的变化，

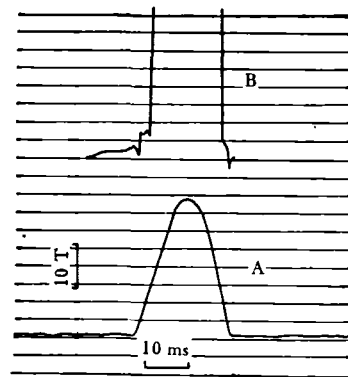


图9 测量 NbTi 超导线的 H_c 时示波器的记录
A——磁场强度波形；B——正常-超导转变时
超导线上的电压变化

两条陡直的线分别记录了超导向正常和正常向超导转变的过程，此时此刻所对应的磁场就是临界磁场 H_c 。在这个磁体中，还测量了铜线在
(下转第 437 页)