

# 超导磁体及其应用

须磊

1911年,荷兰物理学家昂纳斯(Omnes)观察到水银在4K下出现超导现象,随后又发现铅、锡等元素也属于超导物质,但是这些元素的超导状态极易因磁场影响而被破坏,例如铅在550Gs的磁场下就会失去超导状态,因此无法用它们绕制磁体。直到60年代发现铌锆等合金材料具有超导性后,实用超导磁体才得以实现。但是,早期的超导磁体容易受到一些因素(如力、热等)的影响而转变为正常态,从而使磁体损坏;尤其是大型超导磁体,由于储能增加,当磁体失去超导态后极易将磁体烧损,加上冷却磁体的液氮不易获得且比较昂贵,因此它的实际应用受到限制。随着超导及低温技术的发展,在解决和采用一系列稳定性和保护措施后,超导磁体的性能已明显提高,并得到广泛应用。

当导体冷却到某一临界温度以下时,电阻突然降为零的现象称为零电阻现象或超导电性。具有超导电性的物体称为超导体,把电阻突然变为零的温度称为超导转变温度,而把外部条件(例如磁场、电流、应力等)维持在足够低值时的超导转变温度称为超导临界温度,记为 $T_c$ 。当超导体冷却到临界温度以下而转变为超导态后,只要周围的外加磁场没有增强到破坏超导性的程度,超导体就会把穿透到体内的磁场完全排斥出体外,在超导体内永远保持磁感应强度为零,这种性质称为“迈斯纳效应”(完全抗磁性)。零电阻现象和迈斯纳效应是超导体的两个基本性质,它们既相互独立又密切联系。

超导磁体是用超导线绕制的线圈和保持其超低温的容器(低温恒温器)的总称。超导磁体与普通磁体、常规导体相比,具有非常大的优势。常规导体要得到强磁场,就得利用导磁率高的磁性体或是增大线圈和加大电流,然而它的磁性体的磁化特性有极限且磁性体过重,难以在大范围内产生稳定的强磁场,且增大线圈匝数会使其体积增大、重量增加。一般永磁体两极附近的磁场在几千高斯以内,要想再提高它的磁场强度非常困难。电磁铁是用绝缘铜线或铝线绕在铁芯上制成的导磁体,它在产生强磁场时,需要在线圈中通入很大的电流,同时产生高温,放出巨大热量;这样,由于磁体电阻和磁路损耗,大

量电能因转化为热能而被浪费。例如一个粒子加速器实验室的电磁体工作时;常需要用几千千瓦的发电机供电,功率非常大,此外,电磁体磁场越强,消耗电能越多,电磁体温度也越高,这将导致铜、铝导线或绝缘体的熔化,给强磁场的应用带来限制。

与它们相比,超导磁体的特点在于可在大的空间范围内产生很强的磁场,且所需的励磁功率很小,它不需要常规磁体那样庞大的供水和净化设备。它重量轻、体积小、稳定性好,均匀度高,耗能少,易于启动,能长期运转。虽然超导磁体需要用液氮加以冷却,这需要消耗电能,但一旦通电以后,基本上不需要再追加电能,而普通磁体每时每刻都要消耗电能。随着超导低温技术的发展以及新型超导体材料的发现,超导磁体这方面的问题终将得到解决。

目前,超导磁体已成为科学研究的重要工具,它在高能物理、受控热核反应、等离子体物理、生物物理、低温物理、磁学、物质结构分析、医学、交通、工业等很多科学探索研究中得到越来越广泛的应用。

## 超导磁体在大型科学装备上的应用之一 ——高能加速器

高能加速器是用人工办法加速粒子,产生核反应,以研究物质内部结构的装备,在加速器中,为了使粒子能够在固定的轨道上运行,必须施加主导磁场来引导粒子运动。早期的加速器通常采用常规磁铁来产生主导磁场,它不仅体积庞大,而且耗电量惊人,当需要获得较高能量时,不得不增大加速环的半径,从而大大增加加速器建设的费用。采用超导磁体后,磁场强度可提高数倍(例如用NbTi材料,磁场强度可提高2~3倍;用Nb<sub>3</sub>Sn材料,磁场强度可提高4~5倍)。在环半径相同的情况下,采用超导磁体的加速器能量可相应提高数倍,电能消耗和运行费用却大大降低。

加速器磁体主要有二极(偏转)和四极(聚焦)磁体两种。二极磁体,除要求产生一定的磁场强度外,还要求束流孔径内的磁场均匀度达到 $10^{-4}$ ;而四极磁体,则根据加速器的要求,在束流孔径内要产生量级达10~100 T/m的磁场梯度。这些二极和四极磁体将分布在加速器的整个环上,其数量将达上千甚至

上万个,因此对磁体的性能要求非常高。世界上第一台超导加速器是美国费米实验室的 Tevatron 加速器,它是质子对撞机,其能量达0.9 TeV。在周长6.28 km的环上共有774个超导二极磁体和216个超导四极磁体,二极磁体长6.3 m,中心磁场为4.5 T。

到90年代初,商用NbTi超导线的临界电流密度已达 $3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  (4.2 K, 5T)。这样就使超导线的性能进一步提高,同时节省了超导线用量。另外,加速器超导磁场强度提高到6.6 T,并将达到10T的水平。这都说明,超导技术通过这些工程的建设不断发展。

另外,在探测器、核聚变实验等科学领域中超导磁体也得到了广泛应用。

### 超导磁体在生物医学领域的应用

自1973年美国的劳特伯(Lauterbur)发表世界第一张核磁成像图至今,磁共振成像(MRI)已广泛用于医学诊断,如早期肿瘤和心血管疾病等的诊断。由于磁共振成像仪需要在一个大空间内有一个高度均匀和稳定的磁场,超导磁体不仅能满足这一要求,而且在磁场强度方面比常规磁体更有优势。

利用磁共振原理制成的核磁共振谱仪(NMR)已广泛用于物理、化学、生物、遗传和医药科学等的研究。利用超导技术不仅可以产生强磁场,还可以得到磁场梯度,对某些生物医学研究也是很有用的。如利用超导磁分离技术可将顺磁的红血球从血浆中分离出来,制成纯红血球或无红血球的血浆,或将红血球干燥后做储备血浆。

### 超导磁体在电工、交通领域的应用

自实用超导出现后,人们就期待它给电工领域带来质的飞跃。超导技术的应用使现有常规电工装备的性能得到改善和提高;例如同步发电机采用超导励磁绕组,大大提高电枢绕组上的磁场强度,使电机的体积和重量成倍减小,从而使制造更大单机容量的同步发电机成为可能。由于超导励磁绕组没有焦耳热损耗,电机效率可进一步提高,可节省大量电能。低交流损耗的极细丝超导线的出现(丝径一般为0.4  $\mu\text{m}$ ),使超导技术在工频电工装备中得到实际应用。

磁流体发电机是一种将热能直接转化为电能的新型发电方式,其基本原理和传统发电机一样,都是基于法拉第电磁感应定律;不同的是,磁流体发电机中的导电取代了普通发电机的金属导体。磁流体

发电机没有旋转部分,所以单机容量原则上不受限制。这种发电机的有效功率取决于体积,而其损失则决定于表面积,因而机组容量越大,转换效率越高。磁流体发电机包括燃烧室、发电通道、磁体、逆变器器和余热锅炉等部件。其中,磁体是关键部件,因为磁流体发电的高效率只有在采用能产生高磁场和无焦耳热损耗的超导磁体时才能实现;为了实现发电的目的,磁体所产生的磁场方向应与导电液体运动方向互相垂直。为此,磁体线圈结构形式可以是圆鞍型二极磁体,也可以是一对螺管线圈或跑道形线圈等。超导磁铁在电机方面的应用还有超导电机、超导分离装置等等。

说起超导在交通方面的应用,人们马上会想到超导磁悬浮列车。它是利用超导直线电机产生升举力、导向力和推进力,使车厢在轨道上悬浮起来,并推动车厢高速前进。但在静止或低速运行时,它仍利用车轮系统。直线电机推动车轮前进是以无接触方式进行的,为此在轨道上安装了一系列电机相绕组,这些相绕组从电网获得电能并与车厢上的超导磁体相互作用,推动列车前进。

无疑,超导技术的应用将会带来巨大的经济效益和社会效益。除了上述应用之外,还有许多应用项目,如超导贮能线圈、超导电磁推进技术、超导磁拉单晶技术和超导同步辐射光源等都已取得不小的成就。超导技术具有强大的生命力,随着研究工作的进一步深入,超导技术的应用将日益扩大,并为国民经济的发展做出更大的贡献。

(江苏省南京师范大学强化培养部 210046)

## 科苑快讯

### 漂移的星系

围绕银河系运转的小星系 大麦哲伦星云,正在以相对于我们自己的星系每秒 $378 \pm 18$ 千米的速度运动。天文学家用哈勃太空望远镜跟踪观测了这个星系相对于21个遥远类星体的运动情况,这是迄今为止最精确的天文测量数据。

美国马萨诸塞州剑桥的哈佛-史密森天体物理中心(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)的Nitya Kallivayalil说,它将有助于天文学家推断暗物质晕的大小、形状和密度,暗物质占银河系质量的大部分,它维持大麦哲伦星云在轨道上运转。

(高凌云译自 *Nature*, 2006年第1期)