

备技术,发展其实际应用.总之,简单而完美的无限层结构超导体的出现,必将大大推动高温超导研究向纵深发展,高温超导体的内禀特性将在这个系统中露出庐山真面目.

[1] Chr. L. Teske and Hk. Muller-Buschbaum, *Z. Anorg. Allg. Chem.*, **379**(1970),234.
[2] R. Kipka and Hk. Muller-Buschbaum, *Z. Naturforsch.*, **32B**(1977),121.
[3] T. Siegrist et al., *Nature*, **334**(1988),231.

[4] D. Vaknin et al., *Phys. Rev. B*, **39**(1989),9122.
[5] Y. Tokura, *Physica C*, **185-189**(1991),174.
[6] M. Takano et al., *Physica C*, **176**(1991),441.
[7] M. Takano, *Kotabuturi (Solid State Physics)* **25**(1992),251.
[8] M. G. Smith et al., *Nature*, **351**(1991),549.
[9] G. Er et al., *Physica C*, **181**(1991),206; *Physica C*, **196**(1992),271.
[10] X. M. Li et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**(1992), L220.
[11] H. Adachi et al., *Physica C*, **196**(1992),14.

超导磁体的应用

林良真

(中国科学院电工研究所,北京 100080)

超导磁体目前已获得广泛应用,它与常规磁体相比有许多特点,例如可以在大空间产生高磁场而只消耗很少的电能,它可以在更高的电流密度下运行,从而使线圈体积小,重量轻,并可能产生更高的磁场梯度,等等.文章综合介绍了超导磁体主要的应用.

1911年,荷兰物理学家 Onnes 观察到水银在4K 下出现超导现象,随后又发现铅、锡等元素也属超导物质.但是这些元素的超导状态极易受磁场的影响而破坏,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;尤其是对大型超导磁体,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又比较昂贵,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磁体稳定性和保护措施后,目前超导磁体的性能已有明显的提高,有的已开始形成产品走向市场^[1].

超导技术的发展无疑给电工等技术带来质的飞跃,许多过去无法实现的电工装备由于采用超导技术而成为现实或即将成为现实.如它可在常规磁体所不能达到的大空间内产生强磁

场而几乎不消耗电能,从而为一些高技术如核聚变、磁流体发电等实际应用创造了有利条件.另外,目前的常规装备如采用超导技术,不仅将大大改善其性能,而且还可极大地节省电能.

当前超导技术最活跃的领域还是科学实验和科学仪器等高技术领域.早在60年代末,美国阿贡实验室就为其高能物理实验用的气泡室建造了一个直径为4.78m,磁场达1.8T 的超导磁体.随后,美国费米实验室的 Tevatron 加速器和德国汉堡同步加速器中心的 HERA 质子-电子对撞机又成功地采用超导磁体作为其聚焦和偏转磁体,超导磁体数量均达上千个.目前美国和欧洲已开始建造更大型的超导加速器,如美国的超级超导对撞机(SSC),在其87km 长的环上,将采用上万个各种超导磁体,其规模将是空前的.另外,在医疗诊断方面,目前采用超导磁体的磁共振成像装置已成为世界上最受欢迎的临床诊断设备之一,在全世界医院中使用的磁共振成像装置已达数千台.此外,超导核磁共振谱仪等科学仪器也已成为商品并获广泛应用.

超导技术不仅在强电方面有巨大的应用价值,在弱电方面也有重要的实用意义.本文只概括介绍超导磁体的主要应用.

一、超导磁体在大型科学装备上的应用

1. 高能加速器用超导磁体^[2-4]

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电磁铁来产生主导磁场,它不仅体积庞大,而且耗电大,同时由于磁场强度的限制,当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.当采用超导磁体后,磁场可以提高数倍(例如用 NbTi 材料,磁场可提高2—3倍;用 Nb₃Sn 材料,磁场可提高4—5倍),这样,在环半径相同情况下,加速器能量可相应提高数倍,而且还可大大降低电能消耗和运行费用.

加速器磁体主要有二极(偏转)和四极(聚焦)磁体两种.对二极磁体除要求产生一定的磁场强度外,还要求束流孔径内磁场均匀度达到 10^{-4} ;而对四极磁体,则根据加速器的要求,在束流孔径要产生量级达 $10^1—10^2$ T/m 的磁场梯度.这些二极和四极磁体将分布在加速器整个环上,其数量将达上千个甚至上万个.因此,对磁体的性能要求非常高.这对磁体的设计、制造和运行等都提出了一系列严格的要求.

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0.9TeV.在周长6.28km 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6.3m,中心磁场为4.5T.冷却超导磁体所需的液氮由一台5000l/h 氮液化器供应.该加速器于1978年开始建造,1983年完成,1985年投入运行.紧接着1984年德国汉堡同步电子加速器中心开始建造质子-电子对撞机(HERA).其中质子环二极偏转和四极聚焦磁体全部采用超导线圈.质子环能量达0.82TeV.在6.3km 的质子环

上,共安装有422个9m 长的超导二极磁体和224个超导四极磁体.二极磁体中心磁场为4.65T,四极磁体在 ϕ 50mm 的束流内磁场强度梯度为90.18T/m,超导磁体总储能达344MJ. HERA 于1990年建成.90年代初,美国开始在得克萨斯州的达拉斯建造世界上规模最大的超导超级对撞机(SSC),对撞环的周长达87km,能量达 20×20 TeV.根据设计,SSC 共有超导二极和四极磁体10124个,其中二极磁体为8460个.二极磁体长15m,束流孔径50mm,中心磁场为6.6T,工作电流为6500A,预计1999年建成.与此同时,在瑞士日内瓦的欧洲核子联合研究中心(CERN),也准备建造能量为7.7TeV 的质子对撞机(LHC).在27km 的环上将采用1600个10m 长的超导二极磁体,二极磁体的中心磁场将达8—10T,并将运行在1.8K 的温度下.这些工程的完成,无疑地会大大推动低温超导的发展.例如在超导线的性能方面,在70年代末,当时商用超导线的临界电流密度为 2×10^5 A/cm²(4.2K,5T),到80年代中期,则提高到 2.5×10^5 A/cm²(4.2K,5T),到90年代初,商用 NbTi 超导线的临界电流密度已达 3×10^5 A/cm²(4.2K,5T).这样就使超导线的性能进一步提高,同时节省超导线用量.另外,加速器超导磁体的磁场强度也从4.5T 提高到6.6T,并将达到10T(1.8K)的水平.这都说明,通过这些工程的建设,超导技术不断得到发展.

2. 探测器用超导磁体^[2,6]

探测器是研究高能粒子之间相互作用的装置,它需要有一个大口径的磁体在探测器内的空间产生强磁场.早在60年代末,美国阿贡实验室就为其气泡室建造了一个直径为4.78m,中心磁场达1.8T 的超导磁体.为了保证磁体稳定可靠地运行,采用全稳定方式,超导线铜超比高达50,同时采用浸泡冷却方式.因此,相对地讲,超导磁体比较庞大,而且液氮需要量也很大.虽然投资费用与常规磁体相差不多,但是其运行费用一年内就可节约到原来费用的1/6,因此许多高能物理研究单位都相继发展超导磁体.随着超导技术的发展,目前这种大型超导磁体已

有很大改进,首先大多采用铝作为其稳定基底材料.由于高纯铝在低温下具有比铜更低的电阻率,因此铝基超导导线具有较好的稳定性能且重量轻.在磁体结构上,已采用间接冷却的薄壁螺管磁体,近年来又发展超导线圈内绕技术,取消了线圈芯筒.这不仅使线圈结构进一步简单,而且也改善了辐射穿透性能.目前已有十多台这种大型超导磁体在运行,其中大都是80年代发展起来的,其口径都达数米,储能达10—100MJ量级.例如欧洲联合核子中心(CERN)的DELPHI磁体,其线圈内径为5.55m,外径6.2m,长6.8m,中心磁场1.2T,工作电流5000A,储能108MJ,其导线是铝基NbTi线,导线截面为 $4.5 \times 24\text{mm}^2$,采用间接冷却方式.该磁体已于1988年建造完成.

3. 核聚变实验装置中的超导磁体^[2,4]

核聚变是人们长期以来梦想解决能源问题的重要途径.为了实现核聚变反应,目前采用的办法之一是磁约束,即将高温等离子体约束在一起,并悬置于真空中,为此就必须在数十米甚至数百米空间内产生10T量级的磁场,这只有用超导磁体才有可能实现这一要求.但要实现这个要求,超导磁体不仅要承受巨大的电磁力,而且结构十分复杂,同时线圈储能之大,也是前所未有的.因此对超导磁体本身来讲是有许多技术问题需要解决.为此,从70年代末开始,美国与西欧,日本与瑞士一起进行一项大线圈计划,目的是给工程实验堆和商业示范堆的设计提供可靠的数据.这个大线圈计划是由六个D形超导线圈组成环形磁体系统.每个线圈孔径为 $2.5\text{m} \times 3.5\text{m}$,要求环在场强达8T下能正常运行,并能承受相应的脉冲场干扰.这六个线圈分别由美国三个公司以及西欧、日本和瑞士承担,采用了不同导线和结构,不同的磁体设计与冷却方式以积累经验并推动超导技术的发展.环形磁体系统安装在美国橡树岭实验室(ORNL),在分别完成单个线圈的基础上,于1986年7月开始进行六个线圈的组合试验,结果磁场成功地达到8T.由于大线圈计划的顺利完成,西方开始实施新的核聚变反应堆计划(如

NET, ITEL),并进行尺寸更大、场强更高的超导线圈预研工作.

80年代以来已有一些实验研究用的核聚变装置采用超导磁体,例如,日本九州大学的IRI-AMIM,它采用场强达8T的 Nb_3Sn 超导线圈.法国卡达拉切核中心的Tore-Supra装置采用超流氦(1.8K)冷却的NbTi线圈,运行磁场最高可达9T.另外,莫斯科库拉托夫原子能研究所也先后研制了两个超导托卡马克装置T-7和T-15. T-15是采用4.5K强迫冷却的 Nb_3Sn 线圈产生纵向磁场,共有24个线圈,线圈平均直径为2.59m.它于1991年开始调试,虽然首次低温冷却结果不理想,磁体只冷到8—10K,但 Nb_3Sn 线圈已经变成超导态,已可通电运行.

二、超导磁体在生物医学领域中的应用^[2,6]

1973年,美国劳特伯(Lauterbur)发表了世界上第一张核磁成像图后立刻引起人们的注意,并预料这技术有可能用于人体组织成像.目前磁共振成像(MRI)已广泛应用于医学诊断中,用于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均匀度和高稳定性的磁场,而超导磁体不仅能完全满足这一要求,而且在磁场强度方面比常规磁体有明显的优势.目前全世界医院中的磁共振成像仪有80%以上是采用超导磁体,其磁场强度在0.35—2T之间.在实验工作中,这种磁体的磁场强度高达4—5T.

为了达到高均匀度的要求,成像用超导磁体在设计制造上进行了不少改进,如主磁体采用六线圈结构,从而可限制到12阶的磁场谐波,大大提高磁场均匀度,同时还采取补偿线圈来进一步提高磁场均匀度.目前成像用超导磁体在50cm球空间内磁场均匀度已可达20—50ppm.超导磁体还可通过超导开关形成闭环电流运行,这样工作电流可不受外界干扰的影响,提供了一个常规磁体所无法达到的稳定性,其磁场稳定性可达 $10^{-7}/\text{h}$ 以上.

由于低温技术的进步,磁共振成像仪超导

磁体低温容器液氮挥发率已可降低到0.11/h的水平,近年来还发展了在低温容器中安装微型制冷机,利用挥发的氦气再液化补充所消耗的液氮.有了这闭环制冷系统后,原则上不消耗液氮,仅需半年或一年从外部补充一次液氮,这给超导磁体运行带来极大方便.

磁共振成像装置目前已经形成商品并有广阔的市场.如日本东芝公司每月已可生产十台.我国从1987年开始试制磁共振成像用的0.6T超导磁体,已于1990年试制成功,现已提供国内医院使用.

利用核磁共振原理制成的核磁共振谱仪(NMR)已广泛应用于物理、化学、生物、遗传和医药学科等的研究中.由于其谱线间距离及信噪比都与磁场有关,为了从波谱分析中得到更多的信息,增加化学位移,提高分辨率,必然要提高频率和磁场.目前,100MHz(相应磁场为2.35T)以上核磁共振谱仪都采用超导磁体,因为常规磁体已无法满足磁场强度的要求.

核磁共振谱仪除对磁场强度有明确要求外,还要求在一定有效空间内(如 ϕ 20mm)磁场均匀度优于 10^{-7} ,磁场稳定度优于 $10^{-7}/h$.此外,为了使用方便,还要求磁体的低温容器液氮挥发率尽量低,一般应达到半年以上补充一次液氮.这不仅对低温容器设计制造要求很高,而且对磁体参数的选择及运行方式有一定要求,例如要采用可拔电流引线、超导开关等措施.当磁体励磁达到额定值后,通过超导开关使超导磁体按闭环方式运行,并拔出电流引线以减少漏热.同时为了达到足够高的磁场稳定性,要求开关与磁体及磁体内部的接头电阻足够小,如小于 $10^{-11}\Omega$.为了满足磁场均匀度的要求,除主磁体设计有严格要求外,还要采取补偿方式来提高磁场均匀度.目前超导磁体技术已可满足上述要求,并有600MHz(相应磁场强度为14.1T)以下系列谱仪商品,有些国家如美国、德国和日本等已研制出750MHz(磁场相应为17.6T)的谱仪,并准备研制1000MHz(23.5T)的谱仪.

利用超导技术不仅可以产生强磁场,还可物理

以得到磁场梯度,对某些生物医学研究也是很有用的工具.如利用超导磁分离技术可以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,或将红血球干燥后作储备血浆.法国 Saclay 研究中心在70年代末曾研制一个超导磁分离装置,进行了牛血的红血球分离研究.

三、超导磁体在电工、交通领域的应用

自从实用超导体出现后,人们就期待它给电工领域带来质的飞跃,使许多过去无法实现的电工装备成为现实.同时超导技术的应用将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,可以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地减小,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,从而节省大量电能.但是,目前超导导线在交流磁场下,由于磁通将不断流进和流出超导体,因而将产生交流损耗,这样在一定程度上限制了它的应用范围.近年来随着低交流损耗的极细丝超导导线的出现(丝径一般为0.4 μ m),使得超导技术有可能在工频电工装备中亦获得实际应用.

1. 超导电机^[2,5,7]

当前超导电机的研究对象主要是超导同步发电机和超导单极电机.早在1965年,美国AVCO公司就试制成一台立式旋转电枢的8kVA超导电机.紧接着,于1969年美国麻省理工学院试验成功一台45kVA超导发电机模拟机组,从而证明在发电机上采用超导励磁绕组的现实可能性.1972年美国西屋公司又研制出一台5000kVA超导发电机,在此基础上,美国、原联邦德国等国都计划在80年代试制几十万kVA级的超导同步发电机.

与常规电机相比,超导同步发电机具有效率高(比常规电机提高0.5%—0.8%)、重量轻、体积小(可减小1/3—1/2)、单机容量大(可达1000万kVA)和稳定性能好(同步电抗可减少

到1/4)等优点,但采用超导磁体也给电机设计、制造和安全可靠运行带来一系列需要解决的问题。例如超导励磁绕组和电磁设计,超导绕组的阻尼屏蔽结构,电机的真空绝缘和密封技术以及电机的致冷系统和液氮输送技术等。只有在这些技术问题得到完善解决并能保证超导发电机长期安全可靠运行,超导发电机才有可能获得实际应用。另外,目前普遍认为,只有大容量超导发电机(如容量达30万kVA以上)在经济上才有优越性。因此,超导同步发电机的采用是立足于大容量,这样它的应用与发展还与各国电力工业发展政策密切相关。因此,原来美国、德国等国计划80年代研制几十万kVA级超导同步发电机以及90年代制成实用电机的计划已推迟或暂停执行。目前只有日本和俄罗斯等国还在积极进行这方面的研究。前苏联已制成一台30万kVA级超导同步发电机,经低温实验,发现低温容器有漏泄问题,有待进一步改进,日本则计划在1995年制成一台70MVA超导发电机。我国上海发电成套设备研究所经多年研究,亦已试制一台400kVA超导发电机,并曾进行并网试验。

超导单极电机也是超导技术的一个重要应用项目。它是一种没有换向器并能产生恒定直流电的直流电机。超导单极电机可以在所有需要较大容量直流电机的场合获得应用,例如可作为冶炼工业、轧钢传动或其他领域需要的低压大电流的直流或脉冲电源以及用于船舶的电力推进。我国船舶总公司武汉712所于1983年开始了船舶推进用超导单极电机的研制计划,其第一阶段是研制300kW超导模型机组。它采用一对超导螺管线圈,线圈由NbTi超导线绕成,线圈最大场强达6T,电流密度达 $10^4\text{A}/\text{cm}^2$,超导线圈储能达1.3MJ,在转子电枢区($\phi 62\text{cm}\times 60\text{cm}$)平均径向磁场达0.75T。目前该超导单极机已研制完成,正在调试中。

2. 磁流体发电机^[5,7,8]

磁流体发电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,所不同的是

磁流体发电机中的导电流体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决定于体积,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。如果组成磁流体-蒸气联合循环,则发电效率可在常规燃煤电站基础上提高10%—20%。因此,它是一种很有希望、很有潜力的高效、低污染的发电新技术。

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在采用能产生高磁场和无焦耳热损耗的超导磁体的情况下才能实现。

为了实现发电的目的,磁体所产生的磁场方向应与导电流体运动方向相垂直。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。其中圆鞍型二极磁体具有结构合理、节省材料、磁场均匀度好等优点,但线圈绕制工艺比较复杂。80年代,美国阿贡实验室已为磁流体发电机先后研制了两个鞍型超导磁体。第一个鞍型超导磁体(中心磁场为5T,室温孔径0.4—0.6m,磁体长2m)曾在原苏联科学院高温研究所的Y-25磁流体发电装置旁路上运行多年。

我国从60年代起就开始磁流体发电的研究工作。“七五”期间,燃煤磁流体发电研究已列入我国高技术计划。为了配合燃煤磁流体发电研究工作,中国科学院电工研究所研制了一个圆鞍型超导磁体。该磁体由17层共34饼圆鞍线圈组成。线圈内径 $\phi 690\text{mm}$,外径 $\phi 1210\text{mm}$,线圈长1700mm,可在中心磁场为4T下稳定运行。整个磁体重13.6t,其中超导线重3.8t。该磁体已试验成功,即将安装在该所磁流体发电装置上运行。

3. 超导磁分离装置^[2,5,9]

磁分离是利用磁力进行物质的分离。很早以前人们就已采用磁分离办法从非磁性的固体或液体中分离或过滤出强磁性颗粒。但只是近20年来在提高分离所需的磁力上有较大突破后,磁分离才得到进一步的发展,而超导技术的

发展更给磁分离技术带来更广阔的应用前景. 因为超导磁体不仅可产生很高的磁场强度, 同时还可利用它得到各种所需的梯度磁场, 从而使磁分离装置更合理地运用磁路和提高磁力.

目前磁分离装置主要有两种类型: 一种是利用很高的磁场梯度将待选颗粒吸附在所采用的磁化介质上, 即所谓高梯度磁分离技术; 另一种是利用磁力有选择性地使流动粒子流中磁性颗粒偏转, 从而达到分离的目的, 即所谓开梯度磁分离技术. 这两种类型的装置都需要一个背景磁场产生磁力作用在颗粒上. 目前磁分离技术已可进行微弱磁细粒物料的分选, 并在贫矿富集、稀有金属及贵金属提纯、高岭土提纯、煤脱硫以及核废水净化等方面获得应用.

现在国外已有超导磁分离装置投入实际应用. 如美国 Eriez 公司已有磁场强度为 3T、处理量为 10t/h (浓度 30%) 的超导高岭土磁分离机的商品. 我国自 80 年代以来, 也开展了超导磁分离技术研究. 中国科学院电工研究所于 1987 年曾研制一台孔径 8cm, 有效分选长度 40cm, 最高场强为 5T 的超导高梯度磁分离样品试验机, 并进行了多种高岭土样品分选试验及煤脱硫试验. 试验结果表明, 应用超导高梯度磁分离技术能将茂名高岭土现有产品质量由二级土标准提高到一级土标准; 高硫煤脱硫达到无机硫的最高脱除率 76%, 脱灰 26%, 精煤产品率为 76%, 证明了超导高梯度强磁分离脱硫的可行性. 在此基础上, 中国科学院电工研究所与中国科学院低温技术实验中心合作, 研制成功处理量达 3t/h 的超导高梯度磁分离工业性试验样机, 准备推广到矿山运行. 另外, 冶金工业部有色金属研究总院于“六五”期间建立了超导磁分离技术实验室, 从英国引进一套开梯度超导磁分离机并进行钨尾矿的分选等试验研究, 解决了强磁性产品从强磁场中排出等技术问题.

4. 超导磁悬浮列车^[2,3]

随着国民经济的发展, 对交通运输的要求亦愈来愈高, 迫切需要有有时速高达数百公里的快速列车. 从 60 年代后期起, 日本就开始执行超导磁悬浮列车计划. 超导磁悬浮列车是利用超

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, 为此在轨道上安装一系列电机相绕组, 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.

日本为实现磁悬浮列车计划进行了长期艰苦的工作, 并取得了重大突破. 它首先于 1972 年研制一台 MC-100 型实验车, 在 400m 长的试验轨道上浮起 10cm, 时速达 60km. 1977 年日本又研制出 ML500 型磁悬浮列车, 它是采用超导线性同步电机驱动磁悬浮和非接触导向系统. 1978 年在 4.7km 的试验线路上达到时速 347km 的纪录. 1979 年进一步达到时速 517km 的最高水平. 1982 年日本利用 MLU-001 型超导磁悬浮列车进行载人试验, 1987 年载人列车时速达到 400km. 此外还进行三车联合实验, 均取得满意的结果. 日本目前已拟定建设东京至大阪, 长 500km, 时速为 500km 的第一条实用超导悬浮线路计划. 目前已批准第一阶段计划, 即东京至山梨 50km 试验线路, 投资约 25 亿美元, 预计五年内建成. 我国已把磁悬浮列车研究列入“八五”攻关计划, 准备建设一条 300m 长的试验线路. 我国磁悬浮是采用常规直线电机方案, 计划将来利用这种磁悬浮列车作为市区与远郊区交通的工具.

无疑, 超导技术的应用将会带来巨大的经济和社会效益. 除了上述介绍的应用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. 美国的洛斯阿拉莫斯实验室于 1982 年成功地研制成功用于提高电力系统稳定性的 30MJ (最大功率 10MW) 的超导储能装置, 它与泊尔维尼管理局的一条 500kV 输电线联接, 进行提高稳定性试验取得很好的效果. 日本神户商船大学自 70 年代以来就开展电磁推进技术的研究. 1992 年超导电磁推进船已下水试验成功. 该试验船长 30m, 船速达 8 节, 它采用 72 个超导鞍形线圈, 其中心场达 4T. 美国

最近亦将超导电磁推进技术的研究列入计划。另外,80年代以来,美国、英国、日本等国都投入力量从事超导同步辐射光源研究工作。目前世界第一台超导同步辐射光源已在IBM公司的一个工厂中运行。这些都说明超导技术具有强大生命力,并将在国民经济中发挥重要作用。

超导磁体技术是近20多年发展起来的高技术,它在电工、交通、医疗、军工和科学实验领域有重要的现实作用和巨大的开发前景。但是,目前超导磁体技术还属于发展阶段,其中有些已形成商品取得实际效益,有些正在研究开发。超导技术也是一项综合性很强需要多学科配合的技术,它的发展与材料科学、低温技术、超导物理等学科密切相关。

1986年高温超导材料的发现又给超导技术的发展注入了新的生命力,虽然短期内还难使高温超导材料的磁体达到实用化,但从发展看还是有希望获得实际应用。特别是它具有的某些性能,如在液氮温度下,当磁场大于一定值后,临界电流几乎不随磁场增加而下降。因此,

当磁场 $B > 15\text{T}$ 后,其临界电流比现有的超导材料要高,人们预测它将是很有潜力的高场材料。虽然尚不能说它一定能取代目前的低温超导材料,但随着研究工作的进一步深入,它很可能在某些超导磁体应用方面起到一定的作用。超导技术的应用必将日益扩大,并为国民经济的发展作出贡献。

- [1] M. N. Wilson, *Superconducting Magnets*, Clearendon Press Oxford (1983).
- [2] 舒泉声, *超导电工程学*, 机械工业出版社(1989).
- [3] B. H. Wiik, *Proceedings of the 1989 IEEE Particle Accelerator Conference* (1989), 431.
- [4] V. People, *IEEE Trans. on Magnetics*, **25-2**(1989), 1444.
- [5] 严陆光, *电工电能新技术*, No. 3(1992), 1.
- [6] 蒋明, *科技导报*, No. 1(1989), 51.
- [7] 韩翔、林良真, 90年代电工科技进步与发展学术年会论文集, 中国电工技术学会(1991), 140.
- [8] L. G. Yan et al., *Fusion Engineering and Design*, **20** (1993), 299.
- [9] Y. J. Yu et al., *Cryogenics*, **30**(September Supplement 1990), 767.

外磁场对作物种子萌发与生长的影响及其作用机理

习 岗 傅志东

(西北农业大学, 陕西杨陵 712100)

综述了近年来发展的磁处理种子技术及其诱发的生物学效应,介绍了目前对磁场作用机理的探索,指出了磁处理种子的应用技术及机理研究中应注意的问题。

Abstract

The technique of treating seeds by magnetic field developed in recent years and its biological effect are summarized. The study on the mechanism of the effect of magnetic field is also introduced. Several problems on the mechanism study and in the application are pointed out.

磁场作为一种刺激因素对植物体从电子、分子到细胞和代谢的各个层次都可以施加影响。在医学等领域,生物磁学已进入到具体应用

的阶段;在农业科学领域,对于磁场对作物的影响及其增产效应正在进行着广泛的探索。迄今为止,磁场处理作物种子一直是生物磁学中一