

# 超导强磁场

曹效文

超导体的零电阻现象,意味着是不消耗电能的.当超导体刚被发现时,科学家自然就想到了这一特性的应用——主要是强磁场及磁场技术有关的能源技术的应用.所谓强磁场,是相对电磁铁的能产生的磁场强度而言的.其值受到铁芯磁饱和强度(约20k奥斯特)的限制,通常只能产生20k奥斯特左右的磁场.因此,一般把明显高于20k奥斯特的磁场称为强磁场.

早在1911年,翁纳斯及其合作者就着手用当时所发现的软超导体,绕制了世界上第一个超导螺线管磁体.虽经过几年的努力,磁场仅达到几百奥斯特,超导电性就被破坏了.现在知道,软超导体的临界磁场就只有几百奥斯特,临界电流也很低,不可能产生强磁场.1930年,硬超导体Pb-Bi合金被德哈斯和沃葛德发现,并且在20k奥斯特的磁场中仍然继续保持着超导电性.但是,他们也未能用它绕成一个强磁场超

有这种现象.当用药物封闭经穴周围神经时,PE信息通路也同时中断.现已查明,人的体表上有12条高PE线,其PE强度为线外的一倍半左右.这些高PE线与中医所说的经穴、经络线基本重合,从而为经络学说提供了佐证.

PE在药理学领域也具有广泛的应用前景.例如给某个生物体注入某种药剂后,这个生物体的PE如果先发生异常,最终完全消失,表示这种药剂对该生物体是一种毒性物质.注入该毒性物质后,又注入另一种药剂,如果该生物体的PE能恢复正常,则说明该药剂有解毒作用.利用PE还可以检验病人对某些药

导磁体.到了1955年,莫特马用Nb线做成了一个具有铁芯的电磁铁,在4.2k可以产生7k奥斯特的磁

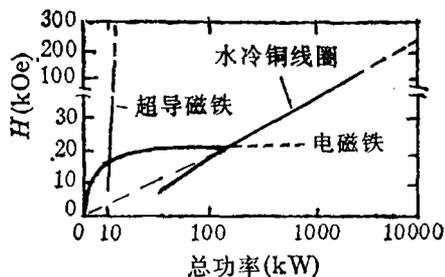


图1 超导磁体,电磁铁和水冷螺线管磁体的功率消耗比较

场,在1960年奥特勒相继用Nb线做出了Nb螺线管超导磁体,在4.2k能够产生4.3k奥斯特的磁场.在更晚的时间,孔兹勒用Mo-Re合金线获得了15k奥斯特的磁场.这些努力的结果都没能成功的用超导体产生一个强磁场,但科学家们并未气馁.孔兹勒及其合作者在1961年发现Nb管Nb<sub>3</sub>Sn(即Nb<sub>3</sub>Sn粉装在Nb管里加工成线,2称孔兹勒管)在80k奥斯特磁场下仍然具有10<sup>4</sup>A/cm<sup>2</sup>的临界电流密度,这才真正开辟了超导强磁场的新纪元.他在1962年制成了场强为70k奥斯特的第一个超导强磁场磁体.1963年马丁用护散Nb<sub>3</sub>Sn电缆成功地制造了第一个超过100奥斯特的超导磁体.在超导强磁场获得突破性进展以后,与磁场有关的超导应用研究也逐渐得到了广泛的发展.这里仅简要介绍超导磁体.超导磁体除了有其自身科学意义外,它还是超导大规模应

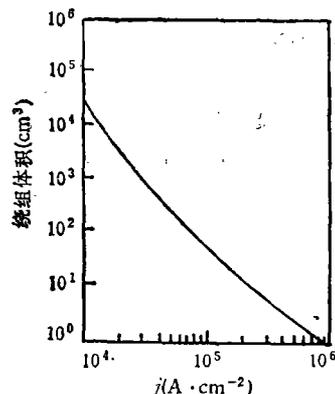


图2 螺线管磁体的体积与电流密度之间的关系.

是否过敏.具体作法是,在患者血清中加入待测的药物,观察混合物的PE.一般情况下,耐药与不耐药两种病人的PE差别很大.这一方法只需要15~20分钟,而且灵敏、准确.

PE作为生命系统的一个极其灵敏的生物指标,已开始应用于许多领域,而且会得到越来越广泛的应用.它的发展前景是令人鼓舞的.但是也应该看到,在PE的基础研究中,还有许多重要的问题没有解决.只有通过更深入的研究,才会更深刻揭示PE的奥秘.我们相信,在不久的将来,PE将会对生命科学研究、医学诊断及对发掘祖国医学遗产做出重大贡献.

PE作为生命系统的一个极其灵敏的生物指标,已开始应用于许多领域,而且会得到越来越广泛的应用.它的发展前景是令人鼓舞的.但是也应该看到,在PE的基础研究中,还有许多重要的问题没有解决.只有通过更深入的研究,才会更深刻揭示PE的奥秘.我们相信,在不久的将来,PE将会对生命科学研究、医学诊断及对发掘祖国医学遗产做出重大贡献.

用的主要技术基础超导磁体还是许多强电应用的基础,这是因为在与电能的生产 and 利用的电器设备中,总是需要磁场的产生,例如:发电机、电动机、变压器、电磁推进、储能、磁悬浮列车等。

### 1. 超导体和常规磁体的功率消耗

超导体具有电阻等于零的基本特性,因此它本身

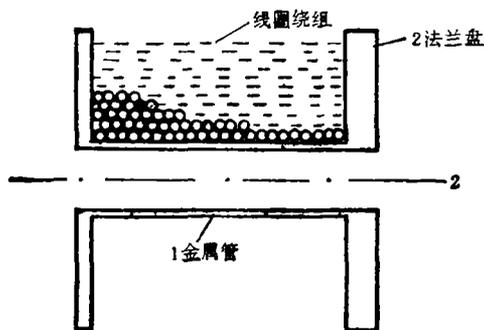


图3 圆筒形超导线圈的结构

是不消耗能量的,在超导装置中所消耗的能量仅是维持足够的低温所需要的制冷能量。图1是超导磁体,铁芯电磁铁和水冷铜螺线管磁体的功率消耗与所产生磁场强度的关系。可以看出,在20k 奥斯特磁场以下,超导磁体的功率消耗与铁芯电磁铁相当。但在20k 奥斯特以上,电磁铁的磁化趋于饱和,即使功率成量级增加,场强却提高不多。超导磁体具有明显的优越性,和水冷铜螺线管相比,超导磁体的单位场强功耗也小得

表1

	外磁体 (I)	外磁体 (II)	内磁体	
净孔径 (mm)	445	180	30	
外径 (mm)	630	422	150	
长度 (mm)	680	665	231	
电流 (A)	1180	1180	130	
导体	Nb-Ti	NbTi <sub>3</sub> Sn	原位 V <sub>3</sub> Ga, 表面扩散 V <sub>3</sub> Ga	
线圈电流密度 (A/cm <sup>2</sup> )	8500	5500	7400	6500
匝数	4043	3520	1974	3984
贡献磁场 (k 奥斯特)	69	173	20	19
储能		6mJ		
运行温度		4.2K		

多。因此超导磁体是最节省能量的。以产生100k 奥斯特磁场为例,水冷螺管功耗是超导磁体的100—200倍左右。

### 2. 超导磁体和常规磁体的重量

一般铜导体在室温下的额定电流密度约为  $5 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>, 而超导线在4.2k 时约为  $10^7$ — $10^6$  A/cm<sup>2</sup>。导体承载电流密度与磁体体积之间有着非常密切的关

表2 18 奥斯特磁体参数

场强	18k 奥斯特
线圈内径	4.8 米
线圈外径	5.3 米
线圈高度	3.0 米
导体电流	1900A
电感	40H (亨利)
储能	80 mJ
线圈重量	45000 kg

系。图2是为产生100k 奥斯特磁场所需导体体积与电流密度*i*的关系,可以看到,当电流密度从  $10^7$  A/cm<sup>2</sup> 降低到  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> 时,所需导体体积增加了500倍。由此可看出,超导体由于高*i<sub>c</sub>*特性,由它所绕制的磁体,在相同空间内产生相同场强所需要的导体体积将会很小,因而重量轻也是必然结果。以图1中的电磁铁为例,重量约3吨,产生场强为20k 奥斯特,对于超导磁体,产生同样体积和场强的超导线组重量大于3kg,仅是电磁铁重量的千分之一。超导磁体重量轻这一特点在航空、宇宙飞船或航天飞机以及航海事业中将具有特殊应用。

### 3. 超导磁体的结构和制作

超导螺线管磁体,主要是由线圈骨架和超导线圈两部分组成的骨架由一个圆形金属管1和两个法兰盘(金属式非金属圆盘)2组成,如图3所示。对于中、小型超导磁体,超导线一层一层的绕在骨架上。

对于用宽的超导带绕制的超导磁体,采用饼式绕法,就象时钟里的发条那样盘成圆饼状,然后一个个圆饼叠在一起组成螺线管磁体。当用大截面的矩形 Nb-Ti 或者 Nb<sub>3</sub>Sn 导线绕制大型超导磁体时,也采用饼式绕法。

中小型超导磁体通常用于科学研究,例如物理实验、化学和生物实验等。这类磁体,80k 奥斯特以下的 Nb-Ti 超导磁体和150k 奥斯特以下的 Nb<sub>3</sub>Sn 超导磁体在六十年代已实现了商品化。

到目前为止,用超导磁体所达到的最高场强是|B|k 奥斯特,它是用 V<sub>3</sub>Ga 和 Nb<sub>3</sub>Sn 和 Nb-Ti 三种材料绕制的三个同轴螺线管在4.2 K 温度下共同产生的。它的主要参数见表1

世界上最大的超导磁体是汽泡室磁体,它用于基本粒子轨迹的探测,这类超导磁体通常具有很大的尺寸和重量。以美国阿贡实验室的汽泡室超导磁体为例,它的内径为4.8米,高度为3.0米,重量为45吨,中心磁场18k 奥斯特。它的主要参数见表2

超导体自1911年发现以来,经过几代人的坚持不懈的努力,在强磁场以及与磁场有关的技术中已经达到了相当广泛的应用,技术上也相当成熟,它有着广阔的前景。