



自然科学知识丛书



超 导 电

自然科学知识丛书

超 导 电

王 其 俊

陕西科学技术出版社

自然科学知识丛书

超 导 电

王 其 俊

陕西科学技术出版社出版

(西安北大街131号)

陕西省新华书店发行 西安新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 5.125 字数 80,000

1980年3月第1版 1980年3月第1次印刷

印数 1—3,750

统一书号: 13202·3 定价: 0.38元

出 版 说 明

实现四个现代化是我国现阶段的中心任务。广大工农兵、青年、干部，迫切需要自然科学方面的普及读物。为满足这种需要，我们编辑一套《自然科学知识丛书》，陆续出版。

这套丛书，力求用辩证唯物主义和历史唯物主义观点，通俗地介绍数学、物理、化学、天文、地理、生物等方面的基础知识和有关新兴科学知识。由于我们水平有限，经验不足，难免有些缺点、错误，希望广大读者批评指正。

前 言

超导电技术是一门正在迅速发展着的新技术，它与能源、材料、激光、高能物理、空间、电子计算机、交通运输、计量、电子技术、医疗等综合性科学技术领域和部门有着密切的关系。我国1978—1985年科学技术发展规划中，将这门技术列为重点发展项目，它也是我省重点科研项目之一。

为了帮助具有中等文化程度的青年、干部，了解有关超导电的一些基础知识，及其在各个科学技术领域和部门中的应用，作者编写了这本小册子。

在编写过程中，西北大学科研处和物理系的领导及同志们给予了巨大的支持；潘龙骧和孙升平同志描绘了全部插图，在此表示诚挚感谢。

由于作者学识水平有限，经验不足，书中缺点错误是难免的，希望读者提出宝贵意见。

目 录

| | | |
|---|-----------------------|--------|
| 一 | 什么是超导电 | (1) |
| | 从通电导线的发热谈起 | (2) |
| | 超导体的发现 | (3) |
| | 超导体的家族 | (6) |
| 二 | 为超导电的出现准备条件 | (9) |
| | 绝对温标 | (9) |
| | 低温的获得 | (10) |
| | 低温的保持 | (20) |
| 三 | 为什么能产生超导电 | (23) |
| | 通常金属中的自由电子是单干户 | (23) |
| | 电子双双成对，结伴而行 | (27) |
| 四 | 超导体的性质 | (33) |
| | 电阻为零 | (33) |
| | 体内磁场为零 | (35) |
| | 磁通量冻结了 | (39) |
| | 一种宏观量子现象——磁通量子化 | (45) |
| | 古怪的磁通涡旋线 | (54) |
| | 令人讨厌的磁通流动 | (56) |
| | 磁通涡旋线有了定居 | (58) |
| | 交流功率损耗 | (60) |
| | 能量壁垒挡不住电子去路 | (61) |

| | |
|-----------------------|--------------|
| 约瑟夫逊的预言 | (65) |
| 五 超导电的应用 | (70) |
| 完美的超导磁体 | (70) |
| 无损耗地储存电能 | (72) |
| 空中悬浮运行的列车 | (75) |
| 电力工业变新颜 | (79) |
| 磁流体发电的基石 | (91) |
| 受控热核裂变发电 | (95) |
| 探索物质更深层次的奥秘 | (97) |
| 变贫矿为宝 | (105) |
| 崭新的船舶推进装置 | (108) |
| 超导电子显微镜 | (110) |
| 理想的磁屏蔽系统 | (113) |
| 计量技术的重大变革 | (115) |
| 让微波技术更加新颖 | (127) |
| 为人类的健康长寿带来福音 | (147) |
| 超导高速电子计算机 | (148) |
| 展 望 | (152) |

一 什么是超导电

当读者拿起这本书时，首先映入眼帘的是封面上那幅彩色画面。圆环形通电线圈内，没有任何电源供电，但其中却流动着永不衰减的电流；在这个线圈的正上方是一个金属球，球中没有任何动力装置，然而它却会稳定地悬浮在空中；不管金属球周围的磁场如何变化，球内的磁场始终等于零……。

读者或许会觉得太神奇了！大概是科学幻想吧？！

不，这就是我们在本书中将要介绍的超导体的一个应用，叫做超导重力仪。人们已经利用它探测地球内层的缓慢变化及预报地震。

不仅如此，本书还将向读者介绍许多更为奇妙的超导体的性质以及这些性质在能源、材料、高能物理、激光、空间、电子技术、计量、运输、医疗等科学技术领域和部门的应用。这些应用将会引起以上领域或部门的重大变革，有可能点燃起一次新的工业革命。

那么，究竟什么是超导体，它到底有哪些性质和用处呢？为了回答这些问题，我们先从通电导线的发

热谈起。

从通电导线的发热谈起

通常的金属，如铜、铝、铁等都是导电的，可以制成导线。但它们的导电能力是不相同的，铜较强；铝次之；铁更次。因此，通电导线经常使用铜导线，有时也使用铝导线，但几乎不使用铁导线。

为了定量地说明金属导电能力的强弱，常常使用电阻率这个物理量。电阻率越大的材料，其导电能力越差。当导线通以电流时，导线将发热。对于材料不同而长度及横截面积相同的导线，当通以同样电流时，电阻率越大的材料，其发热量越大。

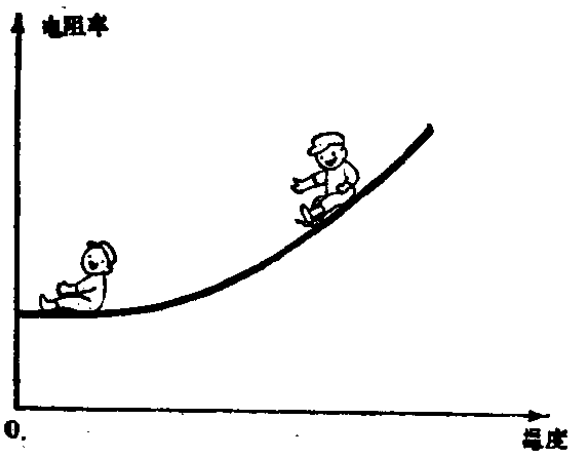


图1 通常金属的电阻率和温度的关系

金属的电阻率还和温度有关。当温度降低时，其电阻率随之减小，最后趋向一个恒定的常数(图1)。这就是说，仅仅靠降低温度的方法，并不能使材料的电阻率无限制地减小，所以，

通电导线的发热是不可避免的。

对于铜、铝、铁三种金属，铜的电阻率最小，导

电能力最强；铝次之；铁的电阻率最大，因而导电能力最差。因此，对于长度和横截面积相同的三种导线，在通以相同的电流时，铜导线的发热量最小；铝导线次之；铁导线的发热量最大。

由于导线发热，使得导线能以传输的电流受到限制，同时这也是电能的白白浪费。例如铜导线，在自然冷却的条件下，所允许的电流密度为2—6安培/毫米²，这就是说，横截面积为1平方毫米的铜导线，能传输的电流最多为2—6安培。电流再大时，铜导线将因发热过大而被烧坏。为了安全地传输更大的电流，必须用冷却设备将生成的热量带走，这就使得用电设备变得非常庞大和复杂，并增加了成本。不妨举一个例子：某单位用铜导线绕制一个场强为10万高斯的磁体，磁体本身要消耗1600千瓦的电力，冷却水的流量为每分钟4.5吨。1600千瓦的电力相当于40000个40瓦的日光灯的用电。因此，人们多么希望有一种没有电阻，因而不会发热的材料呀！

这一理想实现了，这种材料就是超导体。

超 导 体 的 发 现

1908年，一个名叫翁纳斯的科学家第一次将氦气变成了液氦。氦气变成液态氦的温度为 -269°C ，这

是人们第一次获得的最低温度。从此以后，翁纳斯和他的同事们开始研究这个低温区域的物理现象。为了检验另一个科学家提出来的关于所有金属的电阻率和温度的理论关系式，翁纳斯对各种金属的电阻率和温度的关系进行了实际测量。他首先研究的是水银。他先将水银冷却到 -40°C 以下，使水银凝固成一条线，然后继续降低温度，测量水银在各个温度时的电阻率。1911年，翁纳斯发现，当温度从高温降低时，固态水银的电阻率也随之减小。当温度降到接近液氮温度时，水银的电阻率约为 -40°C 时电阻率的百分之一，并没有什么异常现象发生。当温度降低到比液氮温度稍低的温度时，水银的电阻率骤然地变为零(图2)。开始，

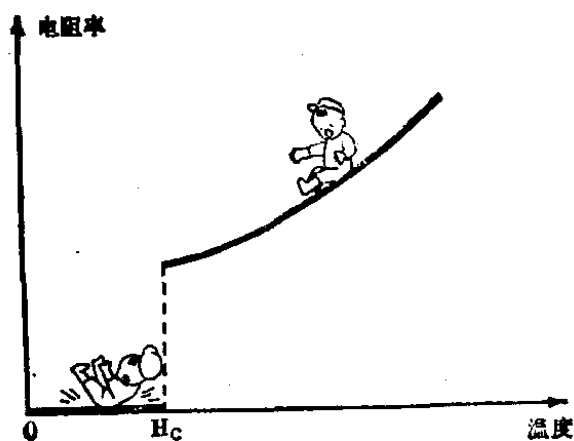


图2 水银的电阻率和温度的关系

他们还怀疑自己的实验结果，因为那时的所有理论都不是这样说的。但经过反复实验，所得结果是相同的。

这个奇妙的结果，震动了当时的物理学界和冶金学界人士，引起了人们的极大重视。

从此以后，人们对许多材料进行了研究，发现其中

的很多材料都具有这样的性质，即它们的电阻率起初都是随着温度的降低而减少的，但到温度等于或低于某一温度时，电阻率变为零。这种现象叫超导电现象。具有这种性质的材料叫超导体。电阻率消失前的状态叫常导状态；电阻率消失后的状态叫超导状态。从常导状态转变为超导状态的温度叫临界温度，用符号 T_c 来表示。每一种超导体都有一个特定的临界温度。

翁纳斯在发现了水银这个超导体后，随即想到：这种超导体既然没有电阻，通上电流后也就不会发热，大概可以传输很大的电流吧？用水银导线绕成的线圈大概可以产生很强的磁场吧？他进行了实验，但实验结果却出乎他的预料。这种导线并不能通过很大的电流；这种线圈并不能产生很大的磁场。这是为什么呢？原来，除了温度以外，磁场也能使超导体发生从超导状态到常导状态的转变。比如，当降低温度使超导体转变为超导状态后，加上一个磁场，使其增加到某一数值后，它将从超导状态转变为常导状态。这个磁场叫临界磁场强度，用符号 H_c 来表示。反之，减小磁场，使磁场强度小于 H_c 时，则它又从常导状态转变为超导状态。

超导体通上电流后，这个电流将产生磁场，当电流逐渐增加时，它所产生的磁场也变大。当该电流在超导体表面所产生的磁场强度等于 H_c 时，它便转变为

常导状态。这个电流叫临界电流，用符号 I_c 表示。 I_c 除以导线的横截面积叫做临界电流密度。

T_c 、 H_c 和 I_c 这三个量是相互关联的，当其中的任意两个量改变时，第三个量也随之变化。

超 导 体 的 家 族

自1911年翁纳斯发现第一个超导体后，人们经过几十年的努力，到目前为止，已经发现 28 种元素、8000 多种化合物和合金具有超导电性。随着科学研究工作的进展，还将发现新的超导体。

28种超导元素在化学元素周期表中的位置如表 1 所示。从表中可以看出，金、银、铜、钾、钠等一价金属良导体不是超导元素；铁、钴、镍等物质也不是超导元素；而那些导电性能差的金属，如钛、锆、铌、铅等都是超导元素，而且临界温度比较高。铌的临界温度最高，铅次之，分别为 -264°C 和 -266°C 。

元素相同而结晶形式不同时，则它们的临界温度是不相同的，如原始的白锡（正方结构）是超导的，而灰锡（金刚石结构）则不是超导体。

将元素加上高压或做成薄膜，使其结晶构造发生变化，也可以改变它们的临界温度，并且可以将原来不是超导的变成超导元素。

如果超导元素有几种同位素，则各种同位素的临界温度是不相同的。

对于由两种元素组成的超导化合物，其组成的两种元素可以全是超导的，如铌三锡 (Nb_3Sn)；或者仅其中的一种是超导的，如钒三硅 (V_3Si)；或者两种都不是超导的，如锶铋化合物 (SrBi_3)。

临界温度较高的化合物及合金是：铌钛合金（铌占35%，钛占65%）、铌钽钛合金（铌占25%，钽占5%，钛占70%）、钒三镓 (V_3Ga)、铌三锡 (Nb_3Sn)、铌三锗 (Nb_3Ge)，它们的临界温度分别为 -262.6°C 、 -263.2°C 、 -257.8°C 、 -255°C 、 -249.95°C 。铌三锗是目前发现的具有最高临界温度的超导材料。

如果将所发现的超导元素、超导化合物和超导合金，按性质进行分类，则可以分成三类：第一类超导体，除了铌、钒以外的超导元素都是第一类超导体；第二类超导体，充分退火的铌、钒及一些合金和化合物是第二类超导体；硬超导体，这类超导体也叫做非均匀的第二类超导体。后一类超导体具有较高的临界温度、临界磁场强度和临界电流密度。上述的铌钛合金、铌钽钛合金、钒三镓、铌三锡、铌三锗均属于这一类。这三类超导体的性质，后面还要详细介绍。

二 为超导电的出现准备条件

绝对温标

迄今,人们发现的超导电材料的临界温度均很低,都在 -250°C 以下。可见,超导电性的显现是和低温的获得技术和保持技术分不开的。由于温度很低,继续使用通常的摄氏温度标尺是很不方便的。在低温物理及其他低温科学研究中,通常使用绝对温度标尺,简称绝对温标,这种温标每一度的大小和摄氏温标相同,但不是以水的冰点作为零度,而是以 -273.15°C 作为零度,叫做绝对零度。绝对温度的一度叫做1开,用符号K来表示。如果绝对温度用T表示,摄氏温度用t表示,则它们之间的关系为:

$$T(\text{K}) = 273.15 + t^{\circ}\text{C}$$

这样一来,水的冰点(0°C)为273.15K;水的沸点(100°C)为373.15K。超导体铌、铅、铌钛合金、铌三锡、铌三镓、铌三锗的临界温度分别为9.2K、7.2K、10.5K、18.2K、15.3K、23.2K。临界温度较低的超

导元素是钨，它的临界温度是 0.016K 。

我们知道，温度是表征物体分子无规则热运动程度的，温度高意味着分子的无规则热运动剧烈，分子热运动的平均动能较大；反之，温度低，则意味着分子热运动的平均动能小。物体的绝对温度与分子热运动的平均动能成正比例。由于分子永远处于不停顿的运动中，故任何物体的绝对温度都不会等于 0K 。这就是说，人们绝对不会得到绝对零度，但却可以获得比绝对零度高一点点的低温。绝对零度所相应的状态是一个可以无限接近，但决不能达到的最冷状态。目前，人们已经得到 0.0000003K 的低温，并继续向绝对零度逼近。

低 温 的 获 得

通常的物体有气态、液态和固态。将气态物体的温度降低到某一特定温度时，它转变为液态，再继续降低温度到另一特定温度时，它转变为固态。为什么降低温度就会使物体发生状态变化呢？原来，气体分子的热运动动能很大，分子间的吸引力较小。降低温度就是不断地取走分子的热运动动能，待它的热运动平缓到足够程度时，吸引力占了优势，它就变成了液体。继续降温，取走液体分子的热运动动能，到一