

材料科学与工程著作系列
HEP Series in Materials Science and Engineering



陈乾旺 等 编著

磁化学 与材料合成

Magnetic Chemistry and Materials Synthesis



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

陈乾旺 等 编著

磁化学 与材料合成

**Magnetic Chemistry and
Materials Synthesis**

CIHUAXUE YU CAILIAO HECHENG



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图书在版编目 (C I P) 数据

磁化学与材料合成 / 陈乾旺等编著. -- 北京 : 高等教育出版社, 2012. 5
(材料科学与工程著作系列)
ISBN 978-7-04-034314-4

I. ①磁… II. ①陈… III. ①磁化学—化学合成—材料科学—研究 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第026672号

策划编辑	刘剑波	责任编辑	焦建虹	封面设计	王凌波	版式设计	王莹
插图绘制	尹莉	责任校对	杨凤玲	责任印制	尤静		

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京铭成印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	11.5	版 次	2012年5月第1版
字 数	210千字	印 次	2012年5月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	39.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34314-00

前言

磁场是研究物质性能的有力手段，因为它直接与物质中基本粒子和磁矩相联系。自 20 世纪以来，随着科学技术的迅猛发展，研究手段不断创新，科学家对物质结构的研究已经深入到原子内部，发现原子内部也是一个小小的磁场。电子围绕着原子核旋转，原子核自身也在旋转，因此都会产生磁场，这些微观的磁场为人类了解物质的化学结构提供了有效的途径。人们对磁场如何影响物质性能产生了很大的兴趣，甚至关于磁场对化学反应的影响的研究也已经广泛开展起来，并创立了一门新的学科——磁化学。磁化学是化学与化工学科极有发展前景的领域，然而在 20 世纪 60 年代以前的近 40 年中，人们只能获得 0.1 ~ 1 T 的磁场，这种强度的磁场对化学反应的影响几乎可以忽略，如 1 T 的磁场与分子作用产生的能量为 11.2 J/mol，远小于通常化学反应所需的活化能 10 ~ 100 kJ/mol，因此过去化学家们总认为反应物与磁场的相互作用能不足以显著影响一般的化学反应，磁场对化学反应基本不起作用。但磁场对物质体系能量的影响随着磁场强度的平方成正比增加，因此在几十 T 甚至 100 T 的超强磁场下，磁场对化学反应体系的影响已经到了非常显著的地步，甚至可以影响化学反应的反应热、化学反应进行的方向、反应速率、活化能等诸多方面。另一方面，根据化学反应的过渡态理论，反应速率常数 k 不仅依赖于温度等因素，而且还受活化焓和活化熵两个结构因素的影响。虽然弱磁场对反应体系能量的影响一般较小，但可以影响反应体系的熵，影响反应速率。

强磁场在材料科学领域的应用涉及物理、化学、工程等学科。在光、磁、电等物理领域，研究过程离不开特殊材料，如磁光材料、多功能薄膜、磁性材料等，而磁场可对这些材料的制备过程产生重要的影响。例如作者所在实验室发现，磁场能导致铁磁性纳米粒子沿易磁化轴取向生长，形成单晶纳米线，理论计算揭示外磁场能改变各晶面的晶面能，从而影响各晶面的生长速率和晶粒的最终外形；还发现，即使外加 0.45 T 的弱磁场也能改变钴薄膜和纳米线的磁畴结构。

自 2000 年以来，作者较早地在磁场下的化学反应和材料合成领域开展研究工作，对国际上该领域的最新进展也较熟悉，因此有意编写一本相关专著，以促进国内该领域研究工作的深入发展。本书包括磁场与磁性物理基础、磁相互作用的原理及其应用、磁场对化学反应的影响、磁场下的材料合成、磁场对

材料结构和性能的影响、磁场诱导纳米粒子组装与有序结构制备等内容。

本书适合于化学和材料科学领域大学本科生、研究生学习参考，也同样可供从事化学合成和材料制备领域的科研人员阅读。本书章节布置和每节所涉及的具体内容由陈乾旺提出，素材主要来自国内外科技期刊和网站公开发表的研究论文和综述报告。第一、二两章由吴明在编，第三章由钱文和和陈乾旺编写，第四章由牛和林编写，第五章由王军编写，第六章由熊鹰和陈乾旺编写，第七章由陈乾旺编。周帅在资料的搜集和整理方面做了大量工作，在此特别感谢！

由于作者水平有限，文献引用也可能存在疏漏，敬请读者指正。

作 者

2012年2月

目 录

1 磁场与磁性物理基础	1
1.1 磁性物理基础	1
1.2 弱磁场与强磁场	5
1.2.1 稳态磁场	5
1.2.2 脉冲强磁场	7
1.3 脉冲强磁场的获得	8
1.3.1 脉冲强磁场的发展历史	8
1.3.2 脉冲强磁场的应用	9
1.3.3 脉冲强磁场的特点	11
1.3.4 脉冲强磁场的产生方法和原理	11
1.3.5 脉冲强磁场发展的瓶颈	13
1.3.6 脉冲强磁场发展的展望	14
参考文献	15
2 磁相互作用的原理及其应用	17
2.1 磁场与颗粒物质的相互作用和磁分离	17
2.2 磁致气体扩散行为的改变与燃烧反应	22
2.2.1 热磁对流效应	23
2.2.2 磁场下的燃烧行为	25
2.2.3 磁场辅助呼吸行为	28
2.2.4 磁致 N_2/O_2 分离	28
2.2.5 磁场与化学反应速率	29
2.3 磁悬浮与晶体生长	30
2.3.1 Earnshaw 理论及其发展	31
2.3.2 磁悬浮的原理	32
2.3.3 磁悬浮的特点	37
2.3.4 磁悬浮条件下晶体的生长	39
2.3.5 磁悬浮条件下晶体的融化	40
参考文献	41
3 磁场对化学反应的影响	45

3.1	概述	45
3.2	磁场影响化学反应的机理	46
3.2.1	影响反应的作用力	46
3.2.2	影响反应的因素	47
3.2.3	自由基对理论	47
3.2.4	笼效应	48
3.2.5	磁场影响化学反应的速率及产率的机理初探	48
3.3	磁场影响下的各类化学反应	49
3.3.1	光化学反应	49
3.3.2	聚合反应	53
3.3.3	电化学反应	56
3.3.4	同位素富集反应	58
3.4	磁场对固相产物生长的影响	59
3.5	结论与展望	60
	参考文献	60
4	磁场下的材料合成	65
4.1	磁场下的电化学沉积	68
4.1.1	磁场下电化学沉积 Fe	68
4.1.2	磁场下电化学沉积 Co	73
4.1.3	磁场下电化学沉积 Ni	75
4.1.4	磁场下电化学沉积复合物	77
4.1.5	磁场下电化学沉积非磁性金属	78
4.2	磁场在溶剂热合成中的应用	80
4.3	磁场在 γ 射线辐照中的应用	84
4.4	外磁场在电弧放电法中的应用	85
4.5	磁场在共沉淀法制备材料中的应用	86
4.6	固相合成过程中引入磁场	88
4.7	磁场在热分解制备材料中的应用	88
4.8	磁场在单晶硅生长中的应用	88
4.9	磁场在金属凝固中的应用	89
4.9.1	直流磁场对凝固过程的影响	89
4.9.2	交变/旋转磁场对凝固过程的影响	91
4.9.3	脉冲磁场对金属凝固过程的影响	92
4.9.4	强磁场下的金属凝固	92
	参考文献	95

5 磁场对材料结构和性能的影响 103

5.1 磁场对材料宏观结构的影响 103

5.2 磁场对材料微结构的影响 104

5.3 磁场对材料晶体结构的影响 110

5.3.1 Verwey 转变简介 110

5.3.2 磁场下合成的 Fe_3O_4 晶粒中的晶格畸变 113

5.3.3 外磁场对共沉淀法合成的 Fe_3O_4 结晶性的影响 121

5.3.4 磁场对 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 铁氧体纳米颗粒微结构的影响 124

5.4 磁场对磁畴结构的影响 130

5.5 磁场对原子和电子结构的影响 135

5.6 结论与展望 138

参考文献 140

6 磁场诱导纳米粒子组装与有序结构制备 145

6.1 磁场诱导组装基础 146

6.2 一维有序磁性纳米结构 148

6.3 二维及三维有序磁性纳米结构 154

6.4 磁场诱导组装液态和固态光子晶体 160

6.5 结论与展望 166

参考文献 166

7 展望 171

参考文献 174

1

磁场与磁性物理基础

1.1 磁性物理基础

固体材料的磁性在近代科学技术中，特别是在电工技术及无线电技术中获得了广泛的应用。物质的磁性在宏观上可以用磁化率 χ 来描述，对各向同性的物质，有：

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (1.1)$$

即 $\chi = \mathbf{M}/\mathbf{H}$ ，式中， $\mathbf{H}$ 为磁场强度， $\mathbf{M}$ 为磁化强度。材料的磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的计算式为

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (1.2)$$

式中， μ 为磁导率， $\mu = \mu_0 (1 + \chi)$ ， μ_0 为真空磁导率。

根据磁化率的大小和符号，固体材料的磁性可分为如下几类。

1. 抗磁性(磁有序)

这类材料的磁化率是数值很小的负数，典型的数值量级为 10^{-6} 。大部分的绝缘体和一部分的简单金属(如金、银等)都具有抗磁性，化学元素周期表中有 34 种元素具有抗磁性。超导体具有完

全抗磁性。完全抗磁性是指超导体在超导态时将其内部磁场完全排出体外的现象，即磁场只能透入超导体表面附近的薄层，而不可能到达超导体内部，这又称迈斯纳效应。引起超导体具有完全抗磁性的原因是，在增大外磁场的过程中，在超导体表面产生感应的超导电流，由该超导电流所产生的附加磁感应强度将体内的磁感应强度完全抵消。完全抗磁性不同于一般的抗磁性，一般抗磁体的磁化率处于 $-1 \sim 0$ 的范围，而完全抗磁性的磁化率为 -1 。

2. 顺磁性(磁无序)

这类材料的磁化率是数值比较小的正数，它与温度 T 呈反比，如图 1.1 所示。即 $\chi = \mu_0 C/T$ ，该式称为居里定律，式中 C 是常数。大部分金属都具有顺磁性。

顺磁材料的磁结构随时间变化的关系如图 1.2 所示。磁矩在空间坐标和时间坐标上都发生很大的变化，然而，其净磁矩却始终为 0。

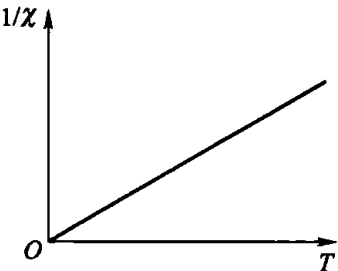


图 1.1 顺磁材料的磁化率随温度变化的曲线

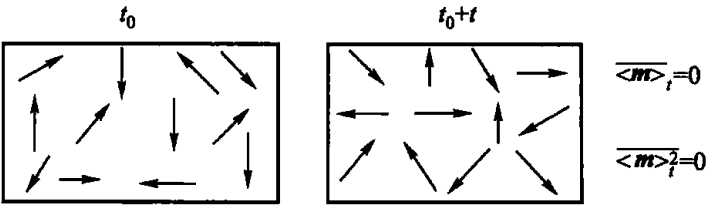


图 1.2 顺磁材料中自旋的无序排列情况

3. 铁磁性(磁有序)

这类材料的磁化率是特别大的正数。在某个临界温度 T_c 以下，即使没有外磁场，材料中也会产生自发的磁化强度。在高于 T_c 的温度，它变成顺磁体，这时磁化率服从居里 - 外斯定律： $\chi = \mu_0 C/(T - \theta)$ 。其磁化率随温度变化的曲线如图 1.3 所示。顺磁居里点 θ 往往和居里点 T_c 很接近，一般 $\theta > T_c$ 。

铁磁材料的磁结构表现为由众多的磁畴所组成，在加磁场的情况下，磁畴会发生长大或偏转，如图 1.4 所示。

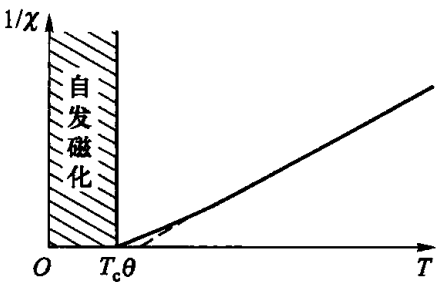


图 1.3 铁磁材料的磁化率随温度变化的曲线

4. 亚铁磁性(磁有序)

这类材料在温度低于 T_c 时的磁化率不如铁磁材料的大，它的自发磁化强度也没有铁磁材料的大。典型的亚铁磁材料是铁氧体。其磁化率随温度变化的曲线如图 1.5 所示。顺磁居里点 $\theta < T_c$ ，且往

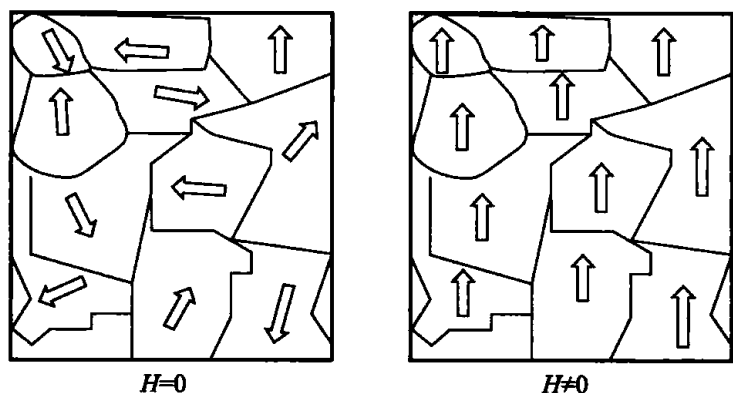


图 1.4 铁磁材料中的磁畴在无场和有场时的磁矩变化

往为负值。

亚铁磁材料的磁结构如图 1.6 所示。

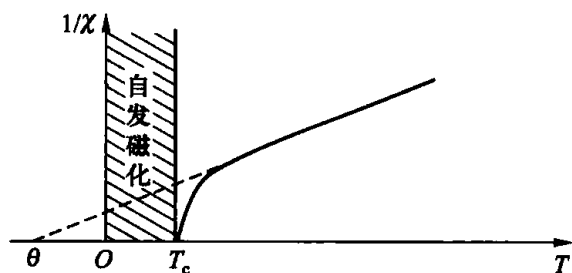


图 1.5 亚铁磁材料的磁化率随温度变化的曲线

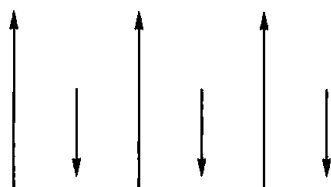


图 1.6 亚铁磁材料中磁矩的排列

5. 反铁磁性(磁有序)

这类材料的磁化率是较小的正数。在温度低于反铁磁转变温度(奈尔温度) T_N 时,反铁磁材料的磁化率 χ 随温度的下降而下降,并且磁化率同磁场的取向有关;在温度高于 T_N 时,它的行为是顺磁性的,磁化率与温度的关系是 $\chi = \mu_0 C / (T + T_N)$ 。其磁化率随温度变化的曲线如图 1.7 所示。

反铁磁材料的磁结构如图 1.8 所示。

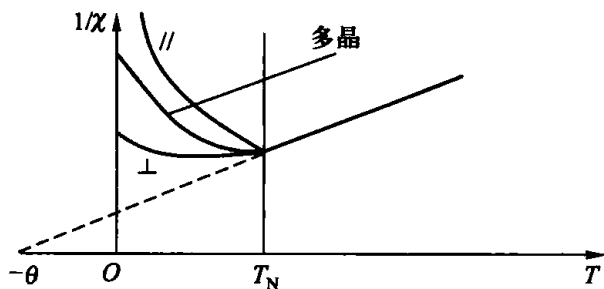


图 1.7 反铁磁材料的磁化率随温度变化的曲线

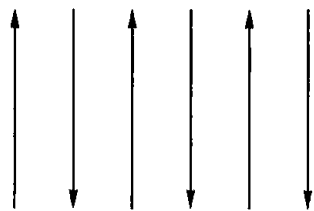


图 1.8 反铁磁材料中磁矩的排列

6. 自旋

自旋玻璃(spin glass)是一种取向无序的自旋体系。在这类体系中,磁矩

之间存在着铁磁相互作用与反铁磁相互作用的竞争。随着温度的降低，整个磁矩系统的取向状态经历一个较为复杂的过程，最终冻结为自旋玻璃状态。从时间坐标上看，每个磁矩因冻结在固定的方向而失去转动的自由度；从空间坐标上看，各个磁矩的冻结方向是无序的。这种自旋玻璃状态不同于长程序的铁磁状态或反铁磁状态，但可以表现出类似于长程序磁状态所具有的合作行为。自旋玻璃进入冻结状态以后，虽然各个磁矩的方向仍然是无规分布，但它与冻结温度以上的顺磁状态有着本质上的差别，顺磁材料磁矩的取向无时无刻不在改变，而自旋玻璃的磁矩都各自冻结在某方向上，如图 1.9 所示。

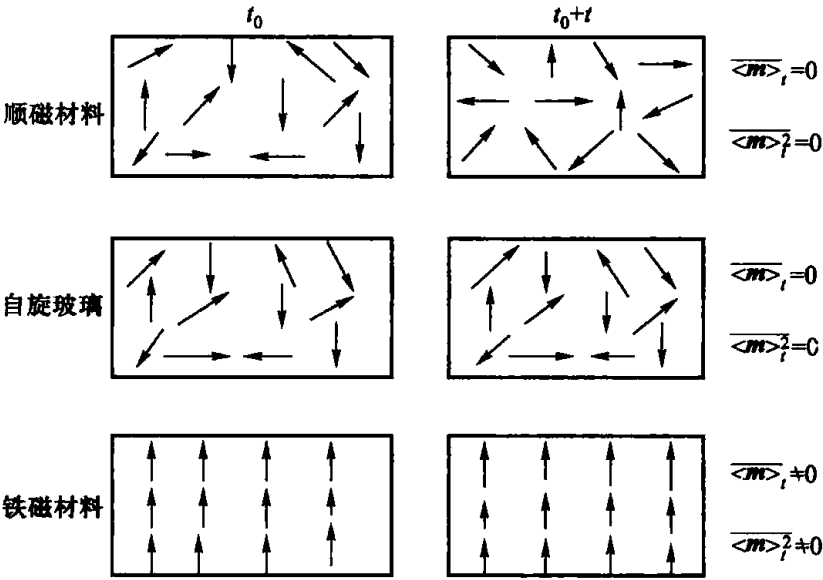


图 1.9 顺磁材料、自旋玻璃和铁磁材料中磁矩随时间变化的行为

自旋玻璃的磁化率在冻结温度 T_f 出现尖峰，磁化率峰的出现表示自旋冻结的程度在宏观上已经有明显的表现。实际上，远在冻结温度以上的温度区域内，造成自旋冻结的各种相互作用已经在影响着自旋玻璃的宏观行为，如图 1.10 所示。

在温度 $T < T_f$ 时，因为热运动能低于自旋磁矩之间的相互作用能，所以磁矩不能自由转动，造成在更低温度下磁化率的急剧下降。在 $T > T_f$ 时，热运动能超过自旋磁矩之间的相互作用能，自旋玻璃表现出顺磁性。自旋玻璃在 $T > T_f$ 时磁化率与温度的关系如下：

$$\chi = c/T - \tau$$

可见，磁化率的实验值遵从居里 - 外斯定律。 τ 不为零时，表示存在着某种相

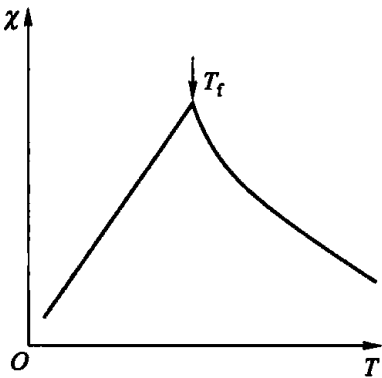


图 1.10 自旋玻璃的磁化率随温度变化的曲线

互作用。

1.2 弱磁场与强磁场

类似于极低温和超高压条件，强磁场作为一种科学研究的极端条件，是现代实验物理研究中最有效的工具之一，为发现新效应、提出新概念提供了更多的科学机遇。1985 年诺贝尔物理学奖“量子霍尔效应”、1998 年“分数量子霍尔效应”以及 2004 年诺贝尔生理医学奖“核磁共振成像技术”就是强磁场在现代科学研究中重要地位的集中体现。比利时 Lueven 大学磁场实验室主任坦言：每次磁场升级，都会得到一些此前不可能预见的新发现^[1]。正因为如此，设计并制造出强磁场就成了科学家们不懈追求的目标。

1.2.1 稳态磁场

磁场可分为连续磁场和脉冲磁场两大类，其中，连续磁场可分为稳恒磁场和时变磁场，稳恒磁场又可分为均恒磁场和梯度磁场。一般来说，常规磁场的磁感应强度 B 多数在 $0.01 \sim 0.1 \text{ T}$ 之间， 1.0 T 以上的磁场就可以称为强磁场。连续强磁场的发生设备主要有电磁铁磁体(resistive magnet)、超导磁体(superconducting magnet)以及兼有电磁铁磁体和超导磁体的混合磁体(hybrid magnet)三种。

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的损耗，大量电能因转化为热能而被浪费。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。

1961 年，Kunzler 制成了第一个超导磁体，获得了 8 T 的强磁场。从此以后，打开了超导研究与应用的新局面。但是早期的超导磁体运行很不稳定，容易发生转变为正常态的现象，即失去超导性能。超导材料有三个基本参量，即临界电流密度、临界温度、临界磁场强度，只要有一个参量超过临界值，超导材料就会失去超导性能。造成失去超导性能的原因既有外部原因又有内部原因。外部原因诸如超导线连接接头接触电阻过大，在通电过程中接头处会出现焦耳热，严重时温升可能超过临界值，从而导致正常区出现。另外，在磁体通电过程中由于电磁力的出现，可能会导致线圈各匝导线间的运动，当载流导体在磁场中运动时将产生能量损耗，从而使运动部位的绕组加热产生温差，超过临界值就会出现正常区。最难预测和最危险的正常区诱因是内部原因，即磁通跳跃，这时磁场将突然穿透整个超导体内部。磁场穿过超导体是一个磁扩散过

程,它不可避免地伴随着发热过程。随着超导科学与技术的发展,这些问题都逐一得到解决。目前,10 T左右的超导磁体制造技术成熟,已经商品化。磁体的购置和运行成本较低,结构简单,使用方便,已经在医疗等领域获得广泛应用。相对常规磁体而言,超导磁体具有以下优越性:

(1) 超导磁体的电流密度比常规磁体的高大约2个数量级,同时它不需要铁芯,重量可减轻1~3个数量级,体积也更紧凑。

(2) 超导磁体没有焦耳热损耗,只在电流引线和为保持磁体处于液氮温度下所需的液化器或制冷机上消耗电能。

(3) 超导磁体可以在大空间获得比常规磁体高得多的磁场。

此外,超导磁体还有一些其他优点,即它容易实现某些常规磁体所达不到的要求,如可以在一定空间达到很高的磁场梯度,这对高能粒子加速器是非常重要的。同时,超导磁体还可通过超导开关形成闭环电流运行,这样磁体电流可不受外界干扰的影响,因而能提供常规磁体所无法达到的稳定性。同时,可以大大地减少液氮的消耗,节约大量的电能,降低运行费用。但这种方法应用于大型磁体还有一些技术问题有待解决。

超导磁体又可分为低温超导磁体和高温超导磁体。与低温超导磁体相比,高温超导磁体具有运行温度高、低温系统简单、运行费用低、稳定性好等特点。尤其在低温强磁场下,具有低温超导磁体所不可比拟的优越性。由于小型制冷机技术的突破和高温超导电流引线的出现,近十来年传导冷却超导磁体技术得到了快速发展。目前传导冷却磁体在很多应用领域已经或正在取代浸泡冷却磁体,直接用制冷机来冷却超导磁体,可以极大地简化系统的复杂性,使系统紧凑并避免使用液氮所带来的问题。这类系统在有电力供应的地方即能使用。但低温超导磁体采用传导冷却时,在交流电源的情况下要达到稳定运行是十分困难的,因为材料在低温下的热导率很小,从而在磁体内部温度梯度太大导致磁体失超。另一方面,高温超导装置运行于较高的温度(≥ 20 K)下,此时材料的热导率和比热容都提高了,这使得装置的稳定性问题容易得以解决。在运行温度大于等于20 K时,经济实用的单级GM(Gifford McMahon)机也能够提供数十瓦的冷量。这样,高温超导磁体就有可能承受因交流谐波或快速励磁而产生的更大的热负荷。同时较高的运行温度可简化低温容器的设计和减少制造费用。

混合强磁场是由在液氮冷却的超导磁体中插入水冷电磁铁线圈构成,将两者产生的磁场叠加可获得更强的磁场。混合磁体的结构复杂,建造和使用成本都很高。因此,混合磁体与电磁铁磁体一般只用于科学研究,实用价值不大。几种强磁场技术的发展历史及趋势如图1.11所示^[2]。

稳态磁体可以长时间工作,是物理研究中最理想的实验装置。它的内径通常在50 mm左右,随着磁场强度的提高,由于电源等方面的限制,内径将减

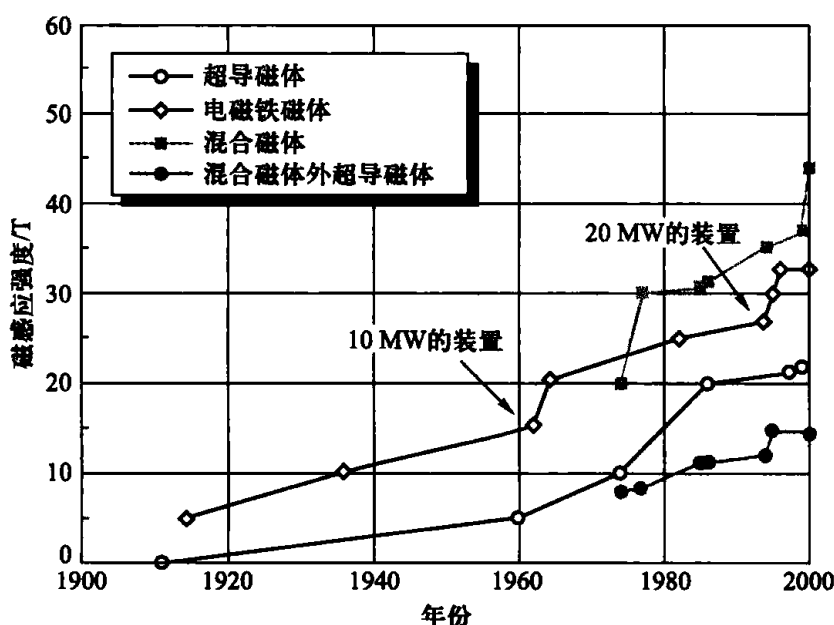


图 1.11 稳恒强磁场发生技术的发展趋势^[2]

少至 30 mm 左右。对于这样的稳态磁体，通常需要一个 20 MW 的电源^[3]。因此，只有比较大的实验室才具备这个条件。目前，位于佛罗里达州的美国国家高磁场实验室(NHML)的混合稳态磁体仍然保持着稳态磁场的最高纪录。该混合稳态磁体由超导磁体和水冷磁体两部分组成，其中水冷磁体内径为 32 mm，电源为 24.6 MW，产生的磁感应强度为 31 T。超导磁体共包括 3 个超导线圈，即一个外层 Nb_2Ti 线圈和两个内层 Nb_3Sn 线圈，内径为 615 mm，在室温时产生 14.3 T 的磁场^[4]。当超导磁体和水冷磁体同时工作时，就可以产生 45 T 的稳态磁场。就目前而言，稳态磁体运行费用较高，并且它所能达到的最高值最终受制于直流电源的容量^[5, 6]。因此，从长远的角度来看，超导磁体将很可能成为稳态磁体的主体，其余为数不多的将是 50 T 甚至 60 T 的混合磁体。

1.2.2 脉冲强磁场

随着科学研究的深入发展，可达到的稳态磁场的磁感应强度(≤ 45 T)已经远远不能满足科学研究的需要。尤其是在微观结构研究方面，科学家们迫切希望得到 100 T 甚至 1 000 T 的强磁场。在 500 T 的超强磁场下，半导体的塞曼分裂能量与铁的交流作用能量相当。另外，粒子回旋运动的轨道半径为 1.2 nm，与晶体中的晶格常数相等。超强磁场必将对物质内部的磁结构和电子结构产生影响，从而影响到物质的性质和变化规律。而与稳态磁体相比，要产生相同强度的磁场，若采用脉冲强磁场技术，在技术上会容易得多。因此，脉冲强磁场技术受到更加广泛的重视。脉冲强磁场的脉宽较窄，一般为数十毫

秒，甚至数十微秒。然而，对大部分物理过程而言，数十毫秒级脉宽强磁场的半周期基本上可以满足使用要求。通常，磁感应强度小于 100 T 的脉冲磁体可以重复放电使用，被称为非破坏型脉冲磁体；100 T 的超强磁场目前还只能通过电磁压缩和爆炸压缩磁通等方法产生，一次性放电使用，因此称为破坏型脉冲磁体^[7,8]。

1.3 脉冲强磁场的获得

1.3.1 脉冲强磁场的发展历史

脉冲强磁场技术开始于 1924 年科学家 Kapitza 的研究，随后众多的科学家投入其中，使脉冲强磁场的发展进入了两个重要的发展阶段。

第一阶段从 20 世纪 50 年代中期开始，科学家开始将脉冲强磁场技术用于磁致电阻效应、迪·哈斯－范·阿尔芬(De Hass-van Alphen)效应等科学研究领域中。自 1960 年美国建立世界上第一个强磁场实验室后，在欧洲的荷兰阿姆斯特丹大学、比利时鲁汶大学、荷兰莱顿实验室、法国图卢兹大学等相继建立起自己的强磁场实验室；而在亚洲，日本在仙台和大阪也建立起两个强磁场实验室。限于技术和材料方面的制约，这时候的脉冲强磁场只能达到 50 T/10 ms，不过脉宽和孔径较 Kapitza 时期已经有了很大的进步。

第二阶段从 20 世纪 80 年代开始，脉冲强磁场技术开始应用到更广泛的科学研究领域中。这期间，一大批脉冲强磁场实验室也相继建立起来，包括牛津大学 Clarendon 实验室、澳大利亚国家强磁场实验室、美国洛斯－阿拉莫斯(Los-Alamos)国家强磁场实验室等。至此，大部分实验室能够产生 60 T 的脉冲强磁场，部分 70 T 的脉冲强磁场也投入实验研究阶段。表 1.1 给出了目前世界上几个主要脉冲强磁场实验室的磁场参数^[9]。从表 1.1 中可以看出，目前全球脉冲强磁场实验室主要分布在西方发达国家。

表 1.1 全球主要脉冲强磁场实验室的磁场参数^[9]

	电 源			实验磁场		时 间	
	能量/ MJ	电压/ kV	电源/ kA	磁感应 强度/T	孔径/ mm	上升时 间/ms	脉宽/ ms
Cambridge (美国)	2.1	4	150	65	13	3.4	7.3
Dresden (德国)	1.25	10	50	50	24	9.5	13

续表

	电 源			实验磁场		时 间	
	能量/ MJ	电压/ kV	电源/ kA	磁感应 强度/T	孔径/ mm	上升时 间/ms	脉宽/ ms
Leuven (比利时)	0.475	5	25	55	18	7	20
	1.2	10	50	70	10	2.3	8
Los-Alamos (美国)	1.6	10	50	60	15	6	35
Kurchatov (俄罗斯)	0.18	5	35	55	15	4.2	9.5
Osaka (日本)	1.5	20	1 000	60	18	3	7
Oxford (英国)	0.8	7	20	60	12	2	10
Parma (意大利)	1.1	3	300	60	27	12	60
Sydney (澳大利亚)	0.8	7	60	60	22	10	25
Toulouse (法国)	14	24	30	61	11	27	150

1.3.2 脉冲强磁场的应用

科学界普遍认为,强磁场在生命科学、材料科学、物理学、信息科学等若干学科领域将产生非常深远的影响。更有科学家深信,强磁场的发展会实现某些学科领域的重大突破。在强磁场应用的相关研究领域,学科发展日新月异,下面是其部分科学研究目标^[10,11]。

1. 半导体与低维系统

在各种物理因素中,外磁场是唯一在保持晶体结构不变的情况下改变动量空间对称性的物理因素。通过对强磁场下半导体材料的光、电等特性开展实验研究,可以进一步理解和把握半导体的光学、电学等物理性质,从而为制造具有各种功能的半导体器件作出基础性探索。