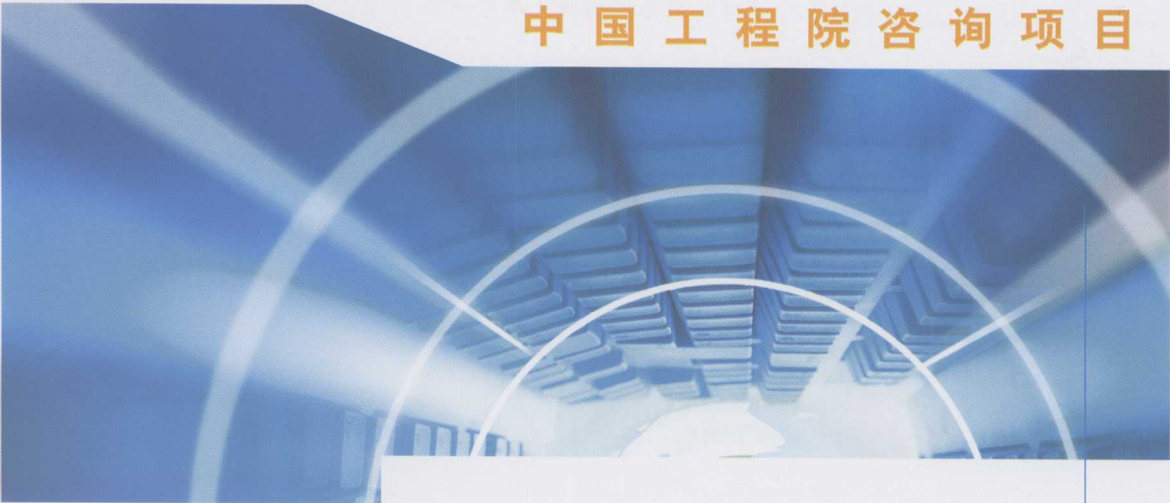


中国工程院咨询项目

中国高温超导材料及 应用发展战略研究

● 周 廉 甘子钊 等编

 化学工业出版社



中国工程院咨询项目

中国高温超导材料及 应用发展战略研究

● 周 廉 甘子钊 等编



 化学工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是中国工程院咨询项目“中国高温超导材料及应用发展战略研究”的研究成果汇编,对2000~2005年国内外高温超导研究进展进行了系统介绍,重点分析了我国高温超导材料及应用的现状和发展趋势,并针对我国高温超导材料和应用研究中存在的问题提出了具体建议。本书可供相关专业研究生和科研工作者作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国高温超导材料及应用发展战略研究/周廉,甘子钊
等编. —北京:化学工业出版社,2007.10
ISBN 978-7-122-01245-6

I. 中… II. ①周… ②甘… III. 高温超导性-超导材料-文集 IV. TM26-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第151737号

责任编辑:陈志良
责任校对:吴静

文字编辑:陈雨
装帧设计:于兵

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张10½ 字数124千字 2008年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:60.00元

版权所有 违者必究

中国工程院咨询项目 《中国高温超导材料及应用发展战略研究》 项目组人员

项目负责人 周 廉 甘子钊

项目组成员

周 廉	西北有色金属研究院研究员 中国工程院院士
甘子钊	北京大学教授 中国科学院院士
朱道本	国家自然科学基金委副主任 中国科学院院士
左铁镭	北京工业大学教授 中国工程院院士
黄崇祺	上海电缆研究所研究员 中国工程院院士
陈立泉	中国科学院物理研究所研究员 中国工程院院士
傅恒志	西北工业大学教授 中国工程院院士
潘 垣	华中科技大学教授 中国工程院院士
卢 强	清华大学教授 中国工程院院士
杨国桢	中国科学院物理研究所研究员 中国科学院院士
郑建超	电力科学研究院研究员 中国工程院院士
马伟明	海军工程大学教授 中国工程院院士

工作组主要成员

张平祥	西北有色金属研究院教授
王金星	东北大学教授
林良真	中国科学院电工研究所研究员
张其劭	电子科技大学教授
吴培亨	南京大学教授
杨乾声	西北有色金属研究院研究员
袁冠森	北京有色金属研究总院研究员
刘宜平	中国科学院物理研究所研究员
闻海虎	中国科学院物理研究所研究员
肖立业	中国科学院电工研究所研究员
冯 勇	西北有色金属研究院研究员
郑东宁	中国科学院物理研究所研究员
王福仁	北京大学教授
唐跃进	华中科技大学教授
古宏伟	北京有色金属研究总院研究员
曹必松	清华大学教授

项目组工作秘书 闫 果 西北有色金属研究院博士

序

高温超导材料应用研究，是当代凝聚态物理和材料科学的一个重要前沿和热点，除了有重大的应用价值外，还有很重大的科学意义。从我国的国情及能源发展战略看，在能源、交通、通讯、医疗等领域采用高温超导技术对于节能减排、提高人民生活质量具有重要意义。

我国的超导研究和开发已有四十多年历史，逐步成长起一支素质较高的超导科技人才队伍。1986年以来，在高温超导材料及应用的基础研究和应用研究方面又不断取得进展。目前，我国在高温超导材料制备、高温超导强电和弱电应用的多个领域已处在世界前列。我国的超导产业也已经初步形成。加之我国在矿产资源上有一定优势条件，应该说我国在发展高温超导科学技术上是有较好基础的。

结合我国的实际情况和发展战略，如何在高温超导材料及应用的研发和产业化上进一步集中人力物力，如何统筹考虑目标明确的重点项目和有一定探索性及风险较大的项目之间的关系等，就成为很重要的战略课题。我们通过中国工程院咨询项目“中国高温超导材料及应用发展战略研究”，组织了国内超导领域的众多知名专家和学者，通过对国内外高温超导材料及应用发展现状和趋势的系统调研、分析和总结，最终形成了本书。感谢所有参与编写本书的同志，他们的辛勤工作使得本书能够最终完成。希望本书能为我国高温超导材料及应用发展提供一些有益的参考。

周济 甘子钊

前言

高温超导材料与技术作为一个具有巨大潜在商业应用前景的高技术产业，一直是高技术领域中的主要热点之一，在能源、信息、交通、科学仪器、医疗技术、国防、重大科学工程等方面将有重要应用。经过近20年的发展，高温超导材料与技术已从基础性和开发示范性的应用技术项目向真正的实用化和形成产品转化。美国、日本、欧洲等均制订了相应的发展计划，以提高本国在高温超导材料及应用的全球竞争能力，并取得了重要的进展。预计高温超导在低压大电流输电、变压器、限流器、中小型储能、超导磁体、移动通信和精密电磁测量、卫星通信等方面的应用将在21世纪成为现实。

目前高温超导材料与技术产业处于起飞的前夜，今后十年是研发高温超导材料先进制备技术和超导应用技术的关键时期，也是我国能否在未来超导技术产业的国际竞争中取得优势的关键时期。我国已将高温超导材料与技术列入“国家中长期科技发展规划”。如何推动我国高温超导材料及其应用的发展及产业化进程，参与超导材料国际市场竞争，提升我国先进材料制造技术、高新技术和制冷技术发展，成为亟待解决的战略性课题。

在上述背景下，在12位中国科学院和中国工程院院士的倡议下，成立了《中国高温超导材料及应用发展战略研究》项目组，中国工程院通过本项目组组织了国内相关超导研究、产业部门的专家，对国内外高温超导材料及应用的现状进行了系统调研，指出了未来10～20年高温超导材料及应用的发展趋势，在此基础上提出了发展我国高温超导材料及其应用的重点和对策。

《中国高温超导材料及应用发展战略研究》项目组

2007年10月

目录

1	导论	1
2	超导领域的基本概况及关键问题	4
2.1	超导材料的基本特性	4
2.2	高温超导材料的发展概况	6
2.3	高温超导技术发展概况	9
2.3.1	超导磁体	11
2.3.2	高温超导强电应用	13
2.3.3	超导电子技术	18
2.3.4	军事应用	20
2.4	高温超导材料及应用的关键问题	20
3	实用化高温超导材料研究进展及发展趋势	22
3.1	高温超导块材进展及发展趋势	22
3.1.1	大尺寸块材的制备	23
3.1.2	提高YBCO和REBCO超导体块材性能的研究	24
3.1.3	REBCO超导块材的生长研究	25
3.1.4	YBCO超导块材的批量化	26
3.2	Bi2223超导带材进展及发展趋势	28
3.2.1	带材性能研究进展	28
3.2.2	Bi2223前驱粉制备方法	31
3.2.3	过压合成技术	33

3.2.4	Bi2223 带材的液氮渗透检验	36
3.3	YBCO 涂层导体及高温超导薄膜进展及发展趋势	38
3.3.1	基带制备技术	42
3.3.2	阻隔层制备技术	47
3.3.3	YBCO 层制备技术	49
3.4	我国涂层导体发展现状及存在问题	55
3.5	高温超导薄膜	56
3.6	MgB ₂ 超导材料进展及发展趋势	59
3.6.1	MgB ₂ 超导线材制备技术	60
3.6.2	提高 MgB ₂ 超导体的性能研究	66
3.6.3	MgB ₂ 超导磁体及器件制备技术研究	69
3.7	展望	74
4	制冷技术的发展为超导应用奠定基础	76
5	高温超导技术发展现状及趋势	79
5.1	高温超导强电应用	79
5.1.1	超导磁体	85
5.1.2	故障电流限制器	87
5.1.3	超导储能装置	92
5.1.4	高温超导变压器	96
5.1.5	HTS 传输电缆	98
5.1.6	超导发电机和电动机	101
5.2	高温超导弱电应用	106
5.2.1	高温超导滤波器	106
5.2.2	基于高温超导结的器件	108
6	国内外高温超导产业发展及市场预测	113
6.1	发展高温超导材料产业的意义	114

6.2	国外高温超导材料市场、产业化现状和发展趋势	116
6.2.1	国外高温超导材料市场情况	116
6.2.2	国外高温超导材料产业化现状和发展趋势	121
6.3	国内高温超导材料产业市场、产业现状和发展趋势	124
6.3.1	国内高温超导材料市场现状	124
6.3.2	国内高温超导材料产业化现状及发展趋势	128
7	高温超导技术在军事领域的应用	131
7.1	超导技术在舰艇方面的应用	131
7.2	超导技术在飞机方面的应用	131
7.3	超导在武器系统的应用	132
7.4	超导技术在军事侦察、通信、电子对抗和 指挥等方面的应用	134
8	美国、日本、欧洲与中国高温超导发展的比较	136
8.1	美国高温超导发展模式	136
8.2	日本高温超导发展模式	137
8.3	欧洲高温超导发展模式	139
8.4	韩国高温超导发展模式	140
8.5	中国高温超导发展模式	141
8.6	各国高温超导发展知识产权情况对比	146
9	我国高温超导材料及应用发展战略及对策分析	148
9.1	我国高温超导材料及应用发展需要解决的问题	148
9.2	高温超导材料及应用产业发展的战略目标	149
9.3	高温超导材料及应用产业化发展重点	149
9.4	高温超导材料及应用产业化发展对策建议	152

1 导论

材料是社会进步的物质基础和先导，对国民经济和国防建设起着关键的支撑作用。新材料指的是那些新出现或正在发展中的具有传统材料所不具备的优异性能的材料。超导材料就是一种具有特殊性质的高技术新材料。超导技术被认为是当代凝聚态物理中最重要的研究领域之一，是当代材料科学一个十分活跃的重要前沿，它与凝聚态物理中一系列有重大意义的基本科学问题都有紧密联系，并将推动功能材料科学的深入发展。超导技术又是21世纪具有战略意义的、有广泛应用和巨大发展潜力的高新技术，在能源、医疗、交通、科学研究及国防军工重大工程等方面有重要的应用价值和巨大的开发前景。超导技术越来越成为一种不可替代的具有经济战略意义和巨大发展潜力的高新技术，将会对国民经济和人类社会的发展产生巨大推动作用。美国能源部认为：超导电力技术是21世纪电力工业唯一的高技术储备，是检验美国将科学发现转化为应用技术能力的重大实践。芬兰科学家最新的研究结果表明，全面应用超导技术可节省能耗、减少二氧化碳的排放，从而可帮助欧洲达到京都议定书的目标。因此发展能耗低、环境友好的超导材料技术对我国在21世纪国民经济和人与社会协调发展方面具有重要的战略意义。

1986年，IBM瑞士研究中心的J.G.Bednorz和K.A.Mueller发现了La系高温超导材料。随后的几年时间里，Y系、Bi系、Tl系和Hg系高温超导材料（临界温度为85～160K）相继被发现。高温超导设备可在液氮温度（77K）运行，与低温超导设备（运行于液氦温度，4.2K）相比，不仅运行成本大大降低，而且磁-热稳定性大大提高。

这就使得超导技术的大规模应用成为可能。因此，发展高温超导应用技术成为国际超导技术界所关注的热点。

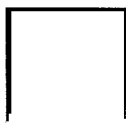
近几年来，高温超导带材、薄膜和块材已经商品化，美国、德国、丹麦、日本、中国和澳大利亚已经可以批量生产高温超导带材。高温超导带材的长度可达到1~2km，工程电流密度达到了 $120\text{A}/\text{mm}^2$ (77K, 0T)，已经基本上满足电工应用的要求。目前，全球已经有多家超导技术公司开始批量生产高温超导带材，实用高温超导材料的价格也正在大幅度下降。预计2010年其价格可以降低到 $50\text{USD}/(\text{kA}\cdot\text{m})$ ，而性能可望大幅度提高。从长远来看，随着第二代高温超导带材成材技术的发展，实用高温超导材料的价格降低到约 $\$10/(\text{kA}\cdot\text{m})$ 以下也是完全可能的。

随着实用高温超导材料的研究取得重大进展，世界各国和相关的公司在高温超导技术的研发方面投入了大量的资金和力量。例如，1996年，美国能源部成立了以发展高温超导电工技术为目的的SPI计划，其中有多家国家实验室和超导技术公司参与研究工作。2001年，美国能源部（DOE）宣布对7个超导应用产品下一阶段的支持，总资金达到1.17亿美元，其中美国能源部拨款5700万美元，比上一轮（八个项目，美国能源部投资3255万美元）有较大的增长。

目前，高温超导技术产业化的呼声越来越高。在强电应用技术方面，高温超导电流引线已经商品化，高温超导磁体技术已经达到实用化水平，高温超导电缆、高温超导限流器和高温超导变压器已经进入示范试验运行阶段；单极高温超导电动机、磁悬浮系统（包括磁悬浮车和磁悬浮飞轮储能系统）以及高温超导磁储能系统也有相应的试验模型问世。在弱电应用技术方面，用于移动通信的高温超导滤波器在技术方面已经接近实用化的水平，美国已有约2000台超导滤波器子系统在移动通信基站进行试验运行；高温超导量子干涉器件已有产品出售，美国、德国和日本等国家已经有多家公司出售此类产品。

我国在超导技术研究领域已有相当的工作基础。目前，我国在铋系带材、铋系准单畴块材、铋系大面积双面薄膜和微波技术应用、超导量子干涉器件以及铋系新型涂层带材等方向与国际水平相当或相近。2001年4月，研制出数根长度超过300m（最长503m）、电流密度超过 $5000\text{A}/\text{cm}^2$ 的Bi系高温超导线材，刷新了中国在该领域的纪录。目前已经具有规模生产的能力，为超导强电应用技术的开发和生产提供了材料基础。完成6m、2kA高温超导电缆的研制，标志我国在高温超导电缆技术研究开发方面跻身于世界先进行列。高温超导限流器、高温超导电缆和高温超导变压器的并网示范试验运行样机的研制正在进行。已经能够制备出 $2\text{in}(1\text{in}=0.0254\text{m})$ 以上的高质量铋钡铜氧高温超导双面薄膜，用于微波通信滤波器子系统的研制。YBCO高温超导块材制备工艺获国家科技进步二等奖；2000年12月利用自己生产的340余块铋钡铜氧块材制备出了世界首辆载人高温超导磁悬浮实验车。目前，块材水平达国际同类材料先进水平，其中，磁浮力大于 $12\text{N}/\text{cm}^2$ ，直径 $\phi 30\text{mm}$ 的单畴块材已实现批量生产。研制成功了适合于我国GSM1800移动通信系统的超导滤波器子系统，其技术参数已达到国外商用产品的水平。但是需要指出，目前我国高温超导材料及应用研究、产业化的总体水平仍落后于发达国家。

根据第五届国际超导工业峰会的预测，高温超导应用技术将在今后5～10年左右的时间内达到实用化的水平，并将在2010年左右形成具有一定规模的产业；到2010年，全球超导产业的产值将达到260亿美元，2020年，将达到2400亿美元以上。美国科学家描绘的景观是：超导技术在21世纪将如同半导体技术在20世纪的境况。美国能源部认为超导电力技术将是21世纪电力工业唯一的高技术储备，发展高温超导电力技术是检验美国将科学发现转化为应用技术能力的重大实践。可以认为：超导技术将是21世纪具有经济战略意义的高新技术，今后5～10年将是在未来的超导技术国际竞争中取得优势的关键时期。



2 超导领域的基本概况及关键问题

2.1 超导材料的基本特性

超导材料具有三个常规材料所不具备的基本特性。

① 零电阻

1908年荷兰莱顿大学昂内斯教授成功地液化了地球上最后一种“永久气体”——氦气，并且获得了接近绝对零度（零下273.2℃，标为0K）的低温：4.2K（零下269℃）。1911年昂内斯发现：汞的电阻在4.2K左右的温度时急剧下降，以致完全消失（即零电阻）。1913年他在一篇论文中首次以“超导”一词来表达这一现象。后来科学家又相继发现了数千种金属、合金、化合物和有机物等都能呈现超导电性。超导现象被发现之后，引起了各国科学家的关注和研究，人们开始把处于超导状态的导体称之为超导体或超导材料。之后科学家做了一个著名的实验，在一个超导体引入电流，环移去电源之后，超导环中的电流持续了两年半而无显著衰减。超导材料的零电阻特性可以用来输电和制造大型磁体。超高压输电会有很大的损耗，而利用超导体则可最大限度地降低损耗，但由于临界温度较高的超导体还未进入实用阶段，从而限制了超导输电的采用。随着技术的发展，新超导材料的不断涌现，超导输电的希望能在不久的将来得以实现。零电阻效应见图2-1。

② 完全抗磁性

1933年，德国物理学家迈斯纳和奥森菲尔德共同发现了超导体的

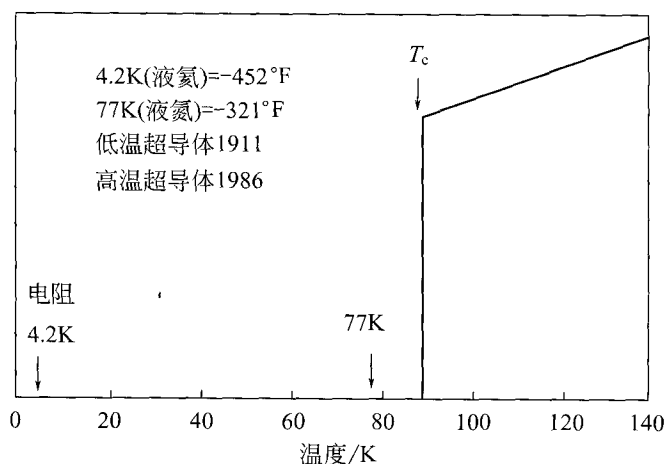


图 2-1 零电阻效应

另一个极为重要的性质，当金属处在超导状态时，这一超导体内的磁感应强度为零，即把原来存在于体内的磁场排挤出去，人们将这种现象称之为“迈斯纳效应”。超导材料的迈斯纳效应使人们可以利用此原理制造超导列车和超导船，由于这些交通工具将在无摩擦状态下运行，这将大大提高它们的速度和安静性能。超导列车已于20世纪70年代成功地进行了载人可行性试验，从1987年开始，日本建成的山梨线正式进入运行。超导磁流体推进船已于1992年1月27日下水试航。利用超导材料制造交通工具势必会引发交通工具革命的一次浪潮。完全抗磁性见图2-2。

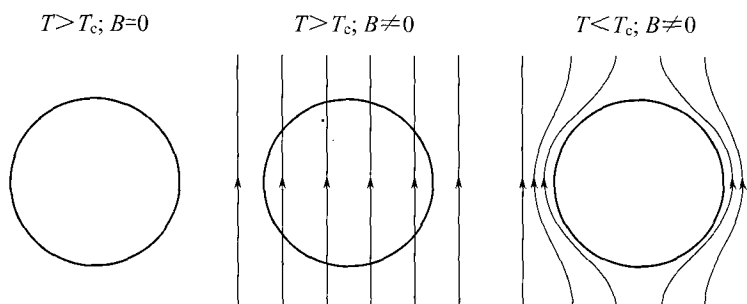


图 2-2 完全抗磁性

3 宏观量子效应

美国物理学家巴丁、库珀和施里弗于1957年首先提出“BCS”理论。这一理论的核心是计算出导体中存在电子相互吸引从而形成一种共振态，即存在“电子对”。1962年英国剑桥大学研究生约瑟夫森根据“BCS”理论预言，在薄绝缘层隔开的两种超导材料之间有电流通过，即“电子对”能穿过薄绝缘层（隧道效应）；同时还产生一些特殊的现象，如电流通过薄绝缘层无需加电压，倘若加电压，电流反而停止而产生高频振荡。这一超导物理现象称为“约瑟夫森效应”。宏观量子效应是超导电子学的基础，可以应用于弱电磁信号检测方面。超导量子干涉仪（SQUID）是目前人类所掌握的能测量弱磁场的手段中最灵敏的磁测量传感器，它的灵敏度比现有其他任何方法都要好2~3个数量级，可以探测强度为地磁场十亿分之一到百亿分之一的磁信号，在弱电磁检测领域具有不可被替代的优越性。宏观量子效应见图2-3。

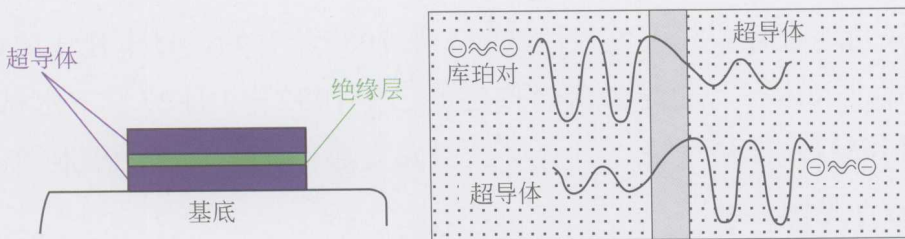
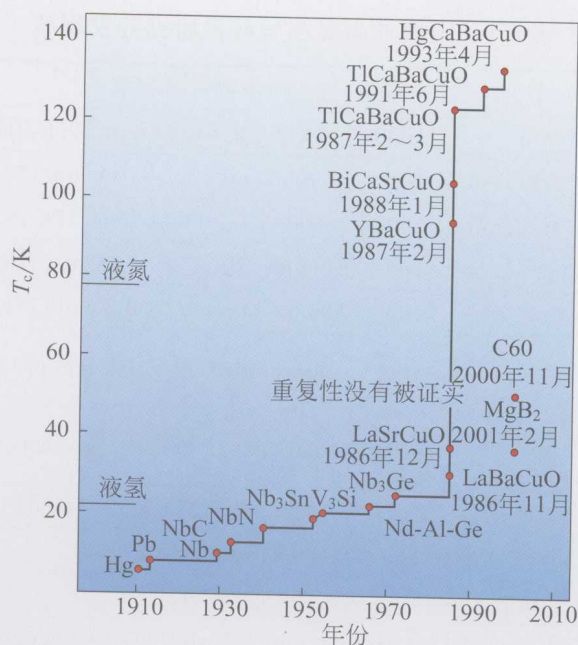


图2-3 宏观量子效应

2.2 高温超导材料的发展概况

超导材料的三个基本特性是常规材料所不具备的，因此超导材料的探索自昂内斯发现Hg的超导电性以来不断取得进展，目前已发现数千种单质或化合物具有超导电性，超导材料的探索历史如图2-4所示。科学家发现超导材料可分为第Ⅰ类和第Ⅱ类超导体，第Ⅱ类超

图 2-4 超导材料 T_c 发展历史

导体才具有实用价值。因此自 20 世纪 60 年代，超导材料的实用化就成为世界范围内的研究热点。目前实用化超导材料均属于第 II 类超导体。1962 年 Kunzle 制备出 Nb_3Sn 超导体，在 4.2K，8.8T 的背景场下，其 J_c 达到了 $4.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ ，标志着实用化超导材料研究的开始。铌基超导体必须工作在液氢环境，这类材料被称为低温超导材料。1986 年，Bednorz 和 Muller 发现了 T_c 达到 38K 的 La-Ba-Cu-O 超导体，标志着氧化物高温超导材料研究的开始。20 世纪 90 年代， T_c 分别达到 92K 的 Y-Ba-Cu-O（简写 YBCO）和 110K 的 Bi-Sr-Ca-Cu-O（即 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ，简写 BSCCO）氧化物超导体被发现，它们可以工作在廉价的液氮环境，因此这类材料被称为高温超导材料。在 1990 年以前，实用化超导材料研究主要集中在低温超导材料。目前低温超导材料已经进入产业化阶段，实用化超导材料研究主要集中在高温超导材料。表 2-1 显示了国内外目前高温超导材料的研究和开发情况。