

特约专栏

# 实用超导材料的发展演变及其前景展望

蔡传兵, 刘志勇, 鲁玉明

(上海大学 超导与应用技术研究中心, 上海 200444)

**摘要:** 超导现象发现100年以来, 各类新型超导体层出不穷, 然而由于本征特性、低温条件、合成技术及环境因素等限制使许多超导材料失去了实用性。首先简要概述了超导材料的应用, 特别是在先进电网中的应用需求和前景, 分析了国内外几种典型的实用超导材料的发展趋势和市场需求情况。给出了主要发达国家及我国的超导发展计划, 指出了当前发展新型电力传输材料——第二代高温超导带材的必要性, 并以上海市为例粗略展望了第二代高温超导带材及其强电应用技术包括城市电缆、超导限流器、超导变压器、超导电机等发展对社会生活和传统产业的重要影响和贡献。

**关键词:** 实用超导材料; 第二代高温超导带材; 先进电力传输

**中图分类号:** O511.9    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-3962(2011)03-0001-08

## Evolution and Prospect of Practical Superconducting Materials

CAI Chuanbing, LIU Zhiyong, LU Yuming

(Research Center for Superconductors and Applied Technologies, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Since the superconductivity was discovered a century ago, various new superconductors have been found endlessly. However, a number of superconductors have lost their practical applications due to limitations from the intrinsic properties, low-temperature requirement, synthesis conditions, and environmental factors. A variety of applications for superconducting materials are summarized particularly with respect to the field of advanced power grids in the near future. The development and evolution of practical superconducting materials are analyzed, together with the market demands. National projects regarding superconducting applications for a few major advanced countries are introduced as well, and the necessities, significance and contributions to the society for development of the secondary-generation superconducting tapes and relevant novel superconducting devices, such as grid cables, fault current limiter, power transformer, and motor etc. in the metropolis like Shanghai, are roughly indicated.

**Key words:** practical superconducting materials; the 2nd superconducting tapes; advanced power grid

### 1 前言

自从1911年荷兰物理学家 Kamerling Onnes 发现超导现象以来, 超导材料的发展经过了一个从简单金属到复杂化合物, 即由一元系到二元系、三元系直至多元系及高分子体系的过程。在上世纪80代末发现铜氧化物超导体之后, 在新世纪之初又有两类比较接近实用的超导材料被发现, 即  $MgB_2$  和 Fe 基超导体, 新型超导体可谓层出不穷。然而, 由于各自不同的本征特性、低温条件、合成技术及其环境污染等因素, 各类超导体的实用化水平相差很大, 有的基本失去实用性, 仅能适于基础

研究。

基于双轴织构和薄膜外延技术的第2代高温超导带材, 由于克服了晶界弱连接和拥有大量位错缺陷提供的高密度的磁通钉扎中心, 在液氮温区具有高的不可逆磁场, 就磁场中的超导载流能力而言, 它为目前最佳的实用超导材料。更为可贵的是, 其技术使用价廉的 Ni 基合金或一般的不锈钢带作为衬底, 材料成本明显低于第1代 Bi 系高温超导带材。第2代高温超导带材已经成为发展超导电力应用的基础和必然选择, 因此当前, 世界主要发达国家均争先恐后地进行研发。

近年来, 美、日、韩和欧洲多国, 已先后成功研制出长度超过100 m, 最长达到1000 m且能够传输100 A以上超导电流的第2代高温超导带材, 使氧化物高温超导材料在能源、电力、交通运输、强磁体和军事领域的大规模应用成为可能, 应用第2代高温超导带材进行的电力示范工程也在不断增加。可以预见, 正如半导体带

收稿日期: 2011-02-11

基金项目: 国家863计划项目(2009AA03Z204); 国家973计划项目(2011CBA00105); 上海市科委科技攻关项目(10dz1203500)

通信作者: 蔡传兵, 男, 1965年生, 教授, 博士生导师

来了资讯时代、光纤带来了传讯时代，高温超导材料将从根本上改变人类的用电方式，给电力、能源、交通以及其它与电磁有关的科技业带来革命性的发展。本文在简要概述超导材料应用，主要是强电应用之后，分析几种典型的实用超导材料的发展趋势和市场需求，进而明确当前发展新型电力传输材料——第二代高温超导带材的必要性。并将以上海市为例粗略展望对第 2 代高温超导带材及其强电应用技术对社会生活和传统产业的重要影响和贡献。

## 2 超导材料及其应用概述

超导材料除零电阻特性外，还具有完全抗磁性和宏观量子效应等诸多常规材料所不具备的奇特性质。利用超导体的这些特性可以传输大电流、获得强磁场、实现磁悬浮、检测微弱磁场信号等，因此超导材料广泛应用于电力、电子、军事、医疗、交通运输、高能物理等诸多领域。

目前，超导材料已发现上千种，包括单质、合金和化合物。从 1911 年第 1 次发现超导现象到 1985 年，超导转变温度最高为铌三锗的 23 K，这些超导材料工作在液氦环境，一般称为低温超导材料。1986 年，Bednorz 和 Muller 发现了  $T_c$  达到 30 K 的 La-Ba-Cu-O 超导体，标志着高温超导研究的开始。紧接着发现了  $T_c$  超过液氮温度(77 K)的 Y-Ba-Cu-O (YBCO,  $T_c = 92$  K)、Bi-Sr-Ca-Cu-O (Bi2223,  $T_c = 110$  K)，Tl-Ba-Cu-O (Tl2223,  $T_c = 127$  K) 和 Hg-Ba-Ca-Cu-O (Hg1223,  $T_c = 134$  K) 等系列氧化物高温超导材料，它们可以工作在廉价的液氮环境，这类材料被称为高温超导材料。1990 年以前，实用化超导材料的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铜氧化物的高温超导材料。

虽然近年来各类新型超导材料层出不穷，包括 2000 年发现的二元化合物  $MgB_2$  和 2008 年发现的 FeAs 超导材料。然而从实用的角度，特别是就电力能源系统的强电应用而言，只有 Bi、Y 系材料才有市场价值。Fe、Tl 和 Hg 系由于含有环境危害元素和特殊的制备工艺，失去了作为一种实用超导材料的广泛性和普适性。

上世纪 90 年代末，随着第 1 代 Bi 系超导材料的制备技术取得重大突破，高温超导线材很快形成产业化生产能力，极大地促进了超导应用技术的发展，如高温超导电缆、高温超导限流器、高温超导变压器、高温超导电动机等已经进入示范运行阶段。超导电力技术的应用可望提升电力工业的发展水平和促进电力业的重大变革。因此，世界主要发达国家均把超导电力技术视为具有经济战略意义的高新技术。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，而日本新能源开发机构(NEDO)则认为发展高温超导电力技术是在 21 世纪的高技术竞争中保持尖端优势的关键所在。可见，超导技术越来越成为 1 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。

高温超导材料可广泛应用于电力、电子、医疗、国防军事、交通运输、高能物理等领域，大致可分为两大类：大电流应用(强电应用)、电子学应用(弱电应用)(见表 1)。超导技术越来越成为 1 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。特别值得指出

表 1 高温超导材料的强电和弱电应用

Table 1 Power and electronic applications for superconducting materials

Application fields	Power application	Electronic application
Smart grid	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superconducting cable</li> <li>• Superconducting fault current limiter</li> <li>• Superconducting transformer</li> <li>• Superconducting accumulator</li> <li>• Superconducting generator</li> </ul>	
Military and defense	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electromagnetic propulsion naval vessels</li> <li>• Superspeed superconducting electromagnetic gun</li> <li>• Superconducting gyroscope</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Superconducting radar</li> <li>◆ Remote sensing</li> </ul>
Traffic and transportation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superconducting high-speed maglev train</li> <li>• Superconducting high-power motors</li> </ul>	
Medical instrument	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superconducting magnetic resonance image</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Magnetocardiographical instrument</li> <li>◆ Magnetoencephalography</li> </ul>
Communication, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large ion cccelerator -collider</li> <li>• TuoKe MaKe device</li> <li>• Magnetic separation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Superconducting quantum interferometer</li> <li>◆ Wireless communication</li> <li>◆ Filter-wired communications</li> </ul>

的是：高温超导带材可制备成各类器件，包括超导储能、变压器、电缆、限流器等广泛用于先进电网之中（见图1）。正如光纤的发明催生崭新的信息时代，高温超导带材也将带来电力工业史上划时代的革命。

目前，世界范围内能源供应越来越紧张，而电能有大量浪费在传输线上。仅美国每年在输电线路上的损失就高达400亿美元。而如果使用高温超导带材，不仅可避

免这些损失，还可以节约大量的金属材料。因为同样直径的高温超导材料的导体能力高于普通铜导线的100倍以上。高温超导带材制成的超导器件具有损耗低、体积小、重量轻和效率高等特点。另外，建设超导智能电网是解决常规电缆远距离输电时对超高压电缆及技术依赖的唯一途径。例如，从内蒙到上海通过传统输电方式至少需要500 kV的电压，而通过超导电缆仅仅需要220 V即可输送。

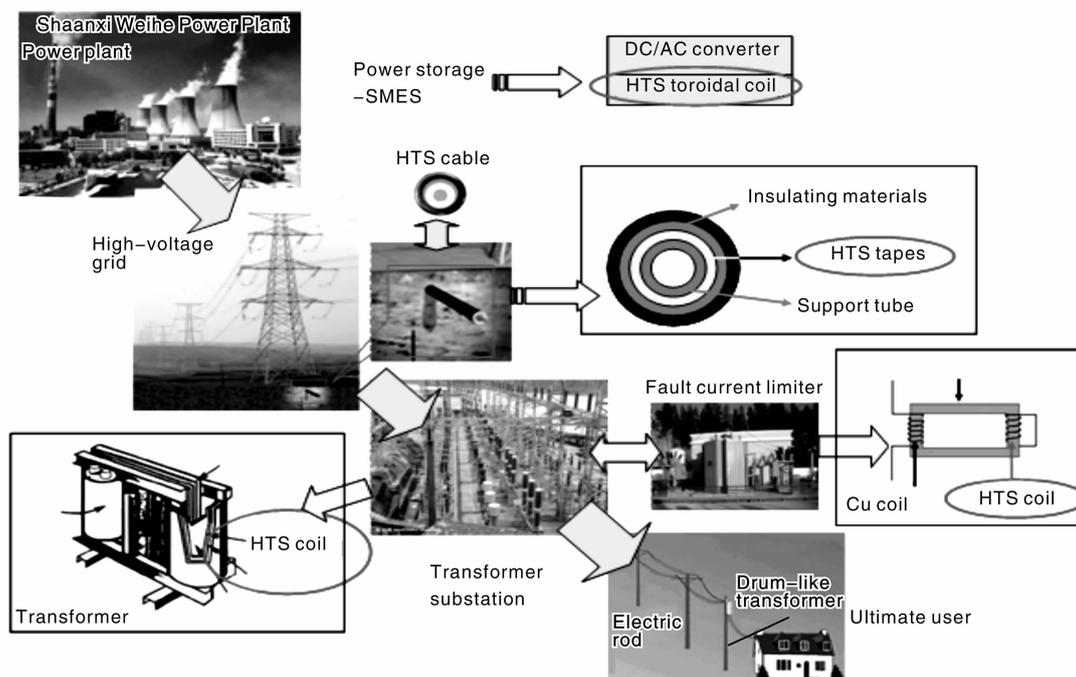


图1 先进电网中的超导应用

Fig. 1 A variety of Superconductor Applications in Advanced Grid

随着经济和社会发展，人们对电能的需求量日益增长，电力系统的容量越来越大，电网将不得不向超大规模方向发展，同时人们对电能质量和安全的要求也越来越高，急需进行电力工业的革新改造。

### 3 实用化超导材料的发展趋势及其市场分析

自1911年超导被发现以来，超导材料的发展经过了一个从简单到复杂，即由一元系到二元系、三元系直至多元系的过程。根据其适用温度及制备工艺的不同，可简单分为低温超导、第一代高温超导和第2代高温超导等几类。考虑到最大的需求是超导带材，这里并没有介绍高温超导块材、单晶外延薄膜和目前尚处于探索阶段的 $MgB_2$  ( $T_c = 40\text{ K}$ ) 超导体。

#### 3.1 低温金属超导体 ( $NbTi$ , $Nb_3Sn$ 线材：传统的拉丝技术)

以 $Nb_3Sn$ 、 $NbTi$ 为代表的低温超导体已实现了商品

化，并得到广泛的应用，尤其在全球医疗和科学仪器方面，如用于医学诊断的核磁共振成像仪(MRI)及用于谱线分析的核磁共振仪(NMR)。目前超导应用在全球医疗和科学仪器方面的年产值大约是100亿美元，低温超导材料占据了整个超导应用领域90%以上的市场。然而低温超导体的临界温度太低，必须在昂贵的液氮系统下使用，严重限制了低温超导在电力能源系统中的应用。

#### 3.2 第1代高温超导带材(Bi系：传统的粉末套装工艺)

Bi系超导线材又称第一代高温超导带材，具有更高的上临界场，可以用来获得更高的磁场。包括中国在内的多家企业可以批量生产出长度为千米级的铋系多芯超导线材。

然而Bi系材料在液氮温区的不可逆场较低，只有在较低温度时才适于强电应用；此外，其交流损耗远太

大,不符合交流传输和变化磁场的应用;另外,普遍使用的粉末套工艺(PIT)离不开贵重金属 Ag,成本甚高,使得基于它的超导技术在工业上的大规模应用前景变得渺茫,世界各国已逐步放弃第一代超导在电力传输方面的应用,将研究重点转移到开发基于 Y 系的第二代高温超导带材上来。

### 3.3 第 2 代高温超导带材(Y 系:现代薄膜生长技术)

Y 系带材晶粒间结合较弱,难以用传统的 PIT 成材工艺制备带材,其成材通常建立在现代薄膜外延生长技术上,称为第二代高温超导带材(也称为高温超导涂层导体)。

与第一代高温超导带材相比,Y 系带材具有较高的不可逆场,在磁场中临界电流密度可维持在很高的水平,突破了 Bi 系材料只能实用于直流和低温的限制,是真正的液氮温区下强电应用的超导材料。更为可贵的是第 2 代高温超导材料以价廉的 Ni 或者 Ni 合金为基带,甚至以一般的不锈钢为衬底,材料成本明显优于第 1 代导体的 Bi-2223 系线带材,性能价格比优势明显,使高温超导在电力工程中的广泛应用成为可能。

### 3.4 高温超导带材的性价比及其市场发展需求

2008 年 3 月美国 Bento Stategy 机构公布的超导市场调查结果显示:世界上大多数研发机构的超导工程计划将选用第 2 代高温超导材料。根据 2003 年美国能源部《美国高温超导材料市场分析与预测报告》预测,随着第 2 代高温超导带材产业规模的扩大及带材性能的提高,其性能价格比将大幅下降至接近  $10 \text{ \$}/\text{kA} \cdot \text{m}$ ,低于铜导线的性能价格比,这同时又会促进市场对高温超导带材的需求。

随着性能价格比的提高,开展各种大规模超导应用也将变为可能,市场需求和产值也将会有显著提高,根据 2003 年美国能源部《美国高温超导材料市场分析与预测报告》初步估计,从 2010 年起,高温超导限流器、电缆等应用将逐渐占据市场主要份额,至 2020 年,超导电动机将占据市场的 79%,其它超导电力设备的市场份额为:超导变压器 76%、超导发电机 50%、超导电缆 80%。国际超导科技界(2007 年世界超导工业峰会)和相关产业部门预测,到 2020 年,全球超导产业超过 2 400 亿美元。以上估算还只是在美国政府尚未公布推进智能电网和超导电网计划的预测值。

上世纪 90 年代美国克林顿政府推行的 NII(National Information Infrastructure)计划,利用光纤技术为基础,成功推进信息产业革命,为美国经济的发展取得了巨大的成功。为了摆脱 2008 年起的全球金融危机,美国希望发起一场新的能源革命。2009 年美国白宫发布的经

济复苏计划意味着奥巴马政府能源计划的下一步将是发展智能电网,以帮助美国走出困境。智能电网是当今世界电力系统发展变革的最新动向,并被认为是 21 世纪电力系统的重大科技创新和发展趋势。美国政府的新能源计划主要包括两张网:即智能电网和超电网。

目前超导电缆的技术、成本、市场等已经具备了进入美国电网改造的主要市场的能力,美国能源法也肯定了超导电缆电网的作用。如果美国的超电网计划真正实施,超导的产值将会有有一个跳跃式的市场需求。中国著名能源研究专家韩晓平预测,美国发展智能电网,8~10 年内整个产业规模将超过 5 万亿美元;同时美国发展超导输电,8~10 年内产业规模将陡增超过 30 万亿美元。通过超电网战略,美国超导的电力应用产业规模在 8~10 年内将达到 25 万亿美元。2008 年美国国民生产总值约为 14.33 万亿美元,按照平均增长率 3%,到 2020 年美国 GDP 将达到 20.43 万亿美元,10 年内总 GDP 约为 194.7 万亿美元,超导电力应用平均约占 GDP 的 12.8%。

虽然中国在超导电力研发和应用都落后于美国,如果我们抓住机会大力发展,有理由相信中国超导电力应用在晚于美国 5 年(2025 年)后可以获得其 1/3 的规模(占全国 GDP 的 5%)。2008 年中国总 GDP 为 4.22 万亿美元,如果保持 9% 的增长速率,到 2020 年可达到 11.9 万亿美元,到 2025 年为 18.26 万亿美元。则 2025 年中国超导电力规模可望达到 9 130 亿美元,其中超导电缆约占 55%,即 5020 亿美元,占全国 GDP 的 2.75%。

2008 年中国电线电缆生产总值占全国 GDP 的 1.6% 左右,约为 700 亿美元,其中电力电缆约占 30%,即 210 亿美元。有关预测显示,我国电线电缆行业在 21 世纪前 10 年将按 10%~15% 的速度增长,如果我们大力发展高温超导电力应用,电力电缆行业可望获得 25% 的增长速度,到 2025 年,全国电力电缆产值将达到 0.94 万亿美元,约占全国 GDP 的 5.1%。美国估计其 2020 年超导电缆将取得 80% 的电缆市场,2025 年我国超导电缆有望取得电力电缆市场的 50%~55%,约为 4 700~5 200 亿美元。

## 4 主要发达国家超导发展计划

超导电力技术多年来一直受到了世界各国的重视。近年来美国和欧洲相继发生了多次大的停电事故,促使政府和工业界进一步加快超导电力技术的研究步伐。美国、日本、欧洲和韩国都制定了一系列发展超导电力技术的相关计划。

### 4.1 美国

世界上超导电力技术研究的带头国家是美国,1999

年美国就开始推进了世界上最大规模的 SPI 研究计划, 以发展超导电力技术及相关技术, 由美国能源部组织国家实验室、大学和相关公司及电力公司联合攻关。该计划的研究内容包括超导电缆、超导变压器、超导电机、超导磁悬浮飞轮储能、超导限流器等项目的研究。

2003 年, 美国东部发生的大停电事故, 使得美国政府对于发展超导电力技术的热情大增, 并立即批准了为期 3 年的 1 200 万美元的超导限流器研究开发项目和 2 600 万美元的高温超导电缆项目。美国能源部还提出了“美国电网 2030 计划”, 在该规划中, 提出了采用超

导技术建设其骨干电网的建议, 美国的能源法中也率先肯定了超导电缆电网的作用(见表 2)。

2008 年美国纽约州长岛在商业电网中安装了第一条第二代高温超导带材输电电缆, 能为 30 万户家庭供电, 其装机容量为 600 MW。之后, 饱受灾难事故和恐怖分子袭击的纽约市宣布启动名称为 Project Hydra 的计划, 即所谓水螅计划, 其主要框架就是 2010 年启动的曼哈顿电网升级改造, 它也将使用美国超导体公司开发的液氮冷却系统和超导电缆, 以实现纽约电力体系更加可靠的运转。

表 2 美国电网 2030 规划远景(美 DOE 资料)

Table 2 Potential products and service made possible by progress toward the national project of grid-2030 (based on DOE documents)

By 2010	By 2020	By 2030
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Customer “gateway” for the next generation “smart meter”, enabling two-way communications and a “transactive” customer-utility interface;</li> <li>• Intelligent homes and appliances linked to the grid</li> <li>• Programs for customer participation in power markets through demand-side management and distributed generation</li> <li>• Advanced composite conductors for greater transmission capacity</li> <li>• Regional plans for grid expansion and modernization transmission cables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Customer “total energy” systems for power, heating, cooling, and humidity control with “plug &amp; play” abilities, leasable through mortgages</li> <li>• “Perfect” power quality through automatic corrections for voltage, frequency, and power factor issues</li> <li>• HTS generators, transformers, and cables will make a significant difference</li> <li>• Long distance superconducting transmission cables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Highly reliable, secure, digital grade power for any customer who wants it</li> <li>• Affordable energy storage devices available to anyone</li> <li>• Completion of a national (or continental) superconducting Long distance superconducting backbone</li> </ul>

#### 4.2 日本、韩国

日本在 20 世纪 90 年代实施了 SuperGM 等超导电力技术研究计划, 并成立了国际超导技术研究中心 (ISTEC), 其主要电力公司及电机制造厂家均积极参与超导电力技术研究工作。

日本超导材料的发展在国际上一直处于领先地位, 为保持优势, 日本设立了为期 5 年(2003 ~ 2007)的第 2 代高温超导带材研发国家计划, 总投资超过 1.5 亿美元, 最终目标是研发出高性能和低成本带材, 每 cm 宽度  $I_c(77\text{ K, 自场}) > 300\text{ A}$ , 长度在 500 m 以上, 而且要大大降低制造成本。该计划顺利完成, 又设立了 2008 - 2012 年计划, 大力发展低成本带材的批量化制备, 目标为开发 3 000 条 10 千米长, 工程临界电流  $I_c = 50\text{ kA/cm}^2(77\text{ K, 自场})$  的第 2 代高温超导带材, 并开展较大规模示范, 包括 SMES ( $> 20\text{ MJ}$ )、超导电缆 (275 kV - 3 kA) 和变压器。

2001 年韩国设立了应用超导技术发展先进能源系统的 10 年计划(即 DAPAS 计划), 主要研究开发高温超导电缆、高温超导限流器、高温超导变压器和高温超导电动机等, 并以商业化为目标。同时成立超导应用技术

中心(CAST), 负责管理该计划的实施。该计划第 2 代高温超导带材的研发分为 3 阶段: 2001 年至 2004 年, 实现 20 A/cm 的 5 m 长带材; 2004 年至 2007 年, 实现 250 A/cm 的 100 m 长带材; 2007 年至 2011 年, 实现 750 A/cm 的 100 m 长带材和 500 A/cm 的 1 000 m 长带材的产业化, 各阶段也有相应的超导电缆、限流器等电力工程应用项目。

#### 4.3 欧洲各国

欧洲为了促进超导电力技术和超导材料的发展, 实施了超导电力联接 (SUPERPOL1) 计划和欧洲超导技术公司合作 (CONECDOC) 计划。欧盟于 1997 年开展了超导电性欧洲网 10 年计划(1997 ~ 2006), 建立欧洲超导研究区域平台, 提升产业界和学术界沟通。该研发基金由欧盟提供, 共涉及 14 个欧洲国家的 42 个学术机构和 21 个工业中心。2007 年欧洲基金会又发布了 2007 ~ 2012 年超导纳米科学与工程项目计划。欧洲一些大的公司如 ABB、西门子、NEXAN 等也积极投资于这方面的研究, 以争取未来的市场。

欧洲超导材料的研发工作由德国牵头, 英国、法国、意大利、西班牙、芬兰等国积极参与。欧洲已有

20 个国家共计 90 多个组织投入到第 2 代高温超导带材的研究中,形成了良好的合作网络。

## 5 发展高温超导带材及其电力应用的必要性和前景展望

每一次国际金融危机都会带来一场上大变革,而决定经济危机应对取得胜利的关键是科技的力量。培育新的经济增长带,特别是新兴的战略型产业占领科技的制高点,也就是占领新型产业的制高点,将决定着一个国家的未来。超导技术无疑已成为目前世界各国全力争取的科技制高点之一。

超导技术是 21 世纪具有战略意义的综合性高新技术,具有前瞻性、战略性。超导带材是超导电力应用的基础,第二代高温超导带材作为目前实用超导材料最为理想的选择和必然发展趋势。毫无疑问,它的研制和发展是占领超导技术与相关高科技产业制高点的重要途径,可创造具有巨大的经济效益和社会效益。

随着美国提出以能源为主的振兴经济计划,能源就成为下一个战略型产业。在奥巴马的能源战略中有两张网,一个是智能电网,一个是超电网。这两张网资源消耗低、带动系数大、就业机会多、综合效益好并具有广阔的市场前景。如前所述,如果美国大力发展超电网,8-10 年内其相应的市场将达到 30 万亿美元,仅此一产业即可抵全球 GDP 的 40% (相对 2008 年 GDP 总值)。

与世界主要发达国家和地区一样,我国主要城市特别上海市,随着经济和社会发展,人们对电能的需求量日益增长,电力系统的容量越来越大,人们对电能质量和安全的要求也越来越高,需要对传统的电力工业技术进行革新改造。根据美国长岛示范工程经验,一根超导电缆大约可以提供 3~5 万个家庭供电,覆盖 10~20 万人口。依此推算,一根超导电缆基本可以满足上海的整个陆家嘴地区的供电。

我国主要城市如上海市,现有的常规电力设备和电力系统存在一些难以克服的缺乏,严重地阻碍电力系统的发展,至少表现在以下几个方面:① 随着电网容量的增加和规模的不断扩大,电力系统的短路容量越来越大。不加限制的短路电流对电气设备和正常的工业生产带来很大的危害,还可能导致电力系统的崩溃;② 常规电力技术缺乏快速功率调节技术。这使得电力系统的功率只能维持基本的平衡。一旦电力系统发生扰动特别是大的故障,可能导致严重的功率失衡,从而引起系统崩溃并对电力系统产生破坏性的危害;③ 常规电力系统的效率受到 Cu, Al 等基本导电材料的限制,要进一

步提高难度很大;④ 常规电气设备占地面积大,而人口密度的大中城市正是负荷中心。随着上海市经济的不断发展,对电能需求量也不断增加,因此电网占地的需求量也越来越大。要解决这一问题,必须对电力系统进行根本性的变革;⑤ 可再生能源如太阳能、风力发电和潮汐能发电的能量密度低,且易受气候条件的影响。要使这些能源能充分有效的利用,必须采用新的技术措施改善其品质,同时使其能有效地储存并与大电网联结。中国科学院最近公布的中国至 2050 年能源科技发展路线图指出:2020 年、2050 年中国电力装备安全技术和电网安全新技术比重将达到 50% 和 90%。届时超导电力装置将在电力系统中得到多层次的大规模应用。

如前所述,世界范围内能源供应越来越紧张,而大量能耗都是浪费在传输线上。2008 年全国社会用电量近 35 000 亿千瓦时,按中国输电损耗率约为 8%~9% 计算,中国每年电量损耗高达 3 000 亿度,相当于 3 个投资在 1 200 亿元以上的核电站总发电容量。其中上海市约占 3.6%,每年损耗约 112 亿度电,折合人民币 100 多亿元。到 2010 年,我国总发电容量将达到 550 GW,电网的总损耗将达到 47 GW,上海地区电网消耗将达到 170 亿度。随着经济的发展及每年总发电量的增加,线路损耗数目将更加庞大。超导材料无电阻,能大幅度地降低输电线路的损耗。通过降低电网的损耗,不仅可提高效率,而且可降低燃煤发电量,从而减少污染排放量。可见,发展超导带材及其传输电缆将提升和改革电力电网,不但能增强经济发展、优化城市环境,而且对节能减排以及低碳经济都有非同寻常的意义。

另外,随着超导材料的规模化生产,超导电力将会得到大力发展,由此形成的超导产业将会整合来自各式各样的新技术研发、新产品制造、新服务企业和新型投融资机制以及标准的制定和安全监控机构等。上海市如能占领超导带材这一超导电力高科技的制高点,可望能创造出新的经济推动力和投资机遇,增加大量的就业机会。

未来 10 年,随着第二代高温超导带材关键制备技术的突破,一个以第 2 代超导带材为核心的超导产业可能会出现井喷现象。由此将会产生行业众多的上、下游产业链,届时我国主要城市,例如上海市的行业格局将会有所变化,也将大大促进上海市相关传统企业的产品更新和技术革新进步(如图 2 所示)。

1967 年光纤被华裔科学家高锟(2009 年诺贝尔物理学奖获得者)发明,30 年后人们利用光纤技术成功推进信息产业革命。1987 年两位华人朱经武、赵忠贤同时发现高于 YBaCuO 超导体,10 年后的 1997 年人

Potential Industrial Series Based on HTS Coated Conductors

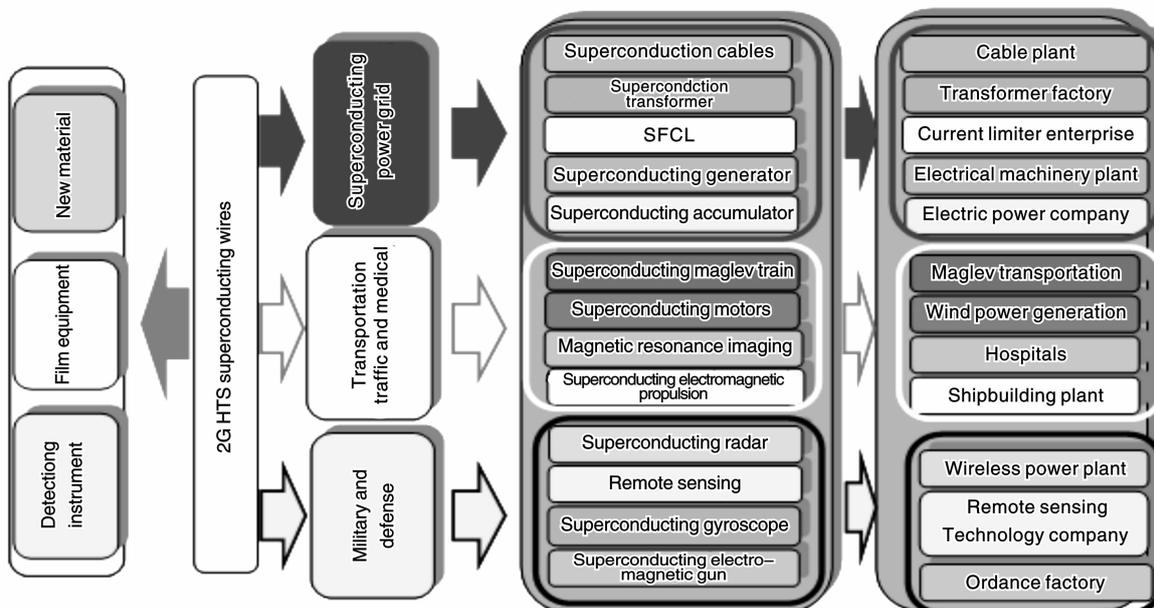


图 2 未来上海市第 2 代高温超导带材产业链展望

Fig. 2 Outlook for future superconducting industrial series in Shanghai

们实现第一代高温超导带材的产业化制备，2004 年实现商业化生产。纵观光纤材料的发明、到首次材料商业化、再到产业化发展的历程，高温超导材料的发展阶段非常相似。由此可以推测超导材料与电缆在电力

传输方面的应用很可能像光纤与光缆在信息传输方面的应用一样在其发现 30 周年后得到大规模的发展（见图 3），这实际上与国内外发展现状和各类预测十分吻合。

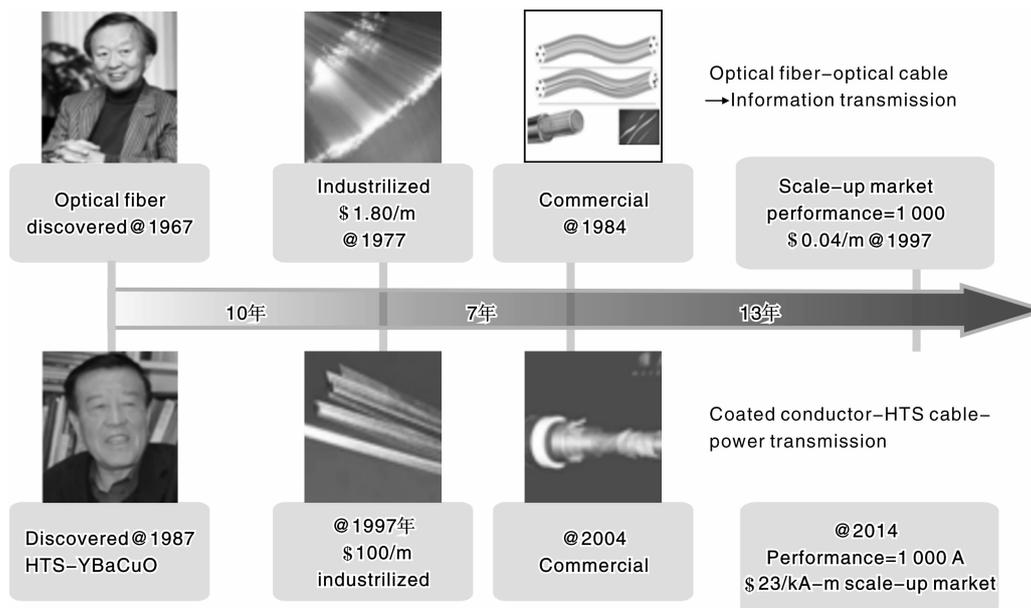


图 3 光纤与高温超导材料及其产业化发展对比

Fig. 3 Direct comparison between optical fibers and superconducting tapes

根据国内外发展态势，未来 10 年之后，随着超导材料的产业化，超导电力应用，包括超导电缆、超导变压器、超导限流器、超导磁悬浮车、超导电磁推进器、

超导电机驱动飞机和高温超导磁成像仪将逐步在上海市的各种领域和场所出现。超导技术最终将给我们的城市带来变革性的影响。超导带材及其电缆应用技术是国家

和地方发展智能电网的迫切需求, 根据 2010 年 7 月上海市人民政府与国家电网在沪签署的关于智能电网建设战略合作协议, 上海市将率先发展智能电网等战略性新兴产业, 将重点发展包括“高温超导”等 7 个方面产业和技术。国家电网与上海市人民政府将分别在北京、上海进行大长度超导电缆并网示范项目建设。为降低成本和防止国外技术封锁, 急需国内有关单位研制出高质量的 2G 高温超导带材, 并能实现批量化制备, 进而为将来超导电力工程产业化发展打下坚实的基础。

## 6 结束语

尽管超导材料种类层出不穷, 实用化高温超导材料却难以一蹴而就。经过近 20 年的发展, 基于 Y 系薄膜的第二代高温超导带材逐步发展成熟, 在完成了千米级连续化外延工艺和性能的优化之后, 已成为目前液氮温度超导性能最好的材料, 处于产业化前夜。为了实现真正意义上的低成本、高机械强度和高不可逆磁场等优势, 满足更广范围的应用需求, 人们正在努力推动第二代高温超导带材向低成本、稳定化和规模化方向发展。

可以预见, 随着第二代高温超导带材研究技术的进一步成熟, 其性能价格比也将大幅下降, 最终将会降低到  $10 \sim 25$   $\$/kA \cdot m$ , 接近或低于 Cu 的性价比。届时开展各种大规模超导应用将变为可能, 市场需求和产值也将会出现井喷的局面。正如半导体带来了资讯时代、光纤带来了传讯时代, 高温超导材料将从根本上改变人类的用电方式, 给电力、能源、交通以及其它与电磁有关的科技业带来革命性的发展。

## 参考文献 References

- [1] CAI Chuanbing(蔡传兵). 高温超导涂层导体-RE123 双轴织构技术及其发展状态[J]. *Progress in Physics*(物理学进展), 2007(4): 467.
- [2] CAI Chuangbing(蔡传兵). *Application and Research for High Temperature Superconductor*(高温超导应用研究)[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2008.
- [3] Larbalestier D, Curevich A, Feldmann D M, et al. High- $T_c$  Superconducting Materials for Electric Power Applications[J]. *Nature*, 2001. 414(15): 368.
- [4] Service R F, Superconductivity- New Wave of Electrical Wires Inches Closer to Market[J]. *Science*, 2005, 308: 348.
- [5] Joseph Mulholland, Thomas Sheahan P, Ben McConnell. *Analysis of Future Prices and Markets for High Temperature Superconductors* [R]. U S Department of Energy, 2003.
- [6] Shiohara Y, Fujiwara N, Hayashi H, et al. Japanese Efforts on Coated Conductor Processing and Its Power Applications: New 5 Year Project for Materials and Power Applications of Coated Conductors (M-PACC)[J]. *Physica C*, 2009, 469: 863.
- [7] Energetics, Incorporated. *Coated Conductor Technology Development Roadmap: Priority Research & Development Activities Leading to Economical Commercial Manufacturing*[R]. U S: Department of Energy Superconductivity for Electric Systems Program, 2001.
- [8] Malozemoff A P, Fleshler S, Rupich M, et al. Progress in High Temperature Superconductor Coated Conductors and Their Applications[J]. *Supercond Sci Technol*, 2008, 21: 034 005.
- [9] CAI Chuanbing(蔡传兵). *Strategy Research Report on Application Development (2010 ~ 2020) of 2nd Age High Temperature Superconducting Tapes*(上海市第二代高温超导带材及应用发展(2010 - 2020)战略研究报告)[R]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002.

\*\*\*\*\*

## 日本成功研制无需稀土强力磁铁

日本东北大学研究生院等科研机构团体宣布, 目前已成功开发出一种无需稀土即可获得强磁力磁铁的基础技术。这种“无稀土磁铁”的磁力可与用于混合动力车的发动机和家电的钕磁铁磁力相匹敌, 预计 2025 年前后该技术将走向实用化。

据悉, 这种磁铁主要由铁和氮物质合成, 无需从中国进口具有供应风险的钕等稀土矿。这将意味着日本先于其它国家, 首次成功合成“强磁性氮化铁”。强磁性氮化铁在大约 40 年前即被看好, 由于纳米合成技术成为可能, 该研究取得巨大发展。

此次研制成功的强磁性氮化铁所需原料由生产磁性材料的户田工业(位于广岛县)提供, 合成技术则由东北大学研究生院的高桥研等教授开发。据悉, 该研究作为独立行政法人新能源产业综合开发机构(NEDO)的项目, 将得到丰田汽车等的协助, 今后共同提高强磁性氮化铁的耐高温性和磁力的持久性。

(From <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2011/3/244702.shtm>)