

NbTi 超导材料及其产业化前景分析

肖新星

(宝钢集团有限公司 新兴产业项目组, 上海 201900)

摘要:超导技术被誉为 21 世纪具有战略意义的高新技术。NbTi 超导材料作为一种商业化的超导材料已有近 30 年的历史。本文主要介绍了 NbTi 超导材料的发展、结构、制备工艺,并回顾了我国 NbTi 超导材料的发展历史,分析了 Nb-Ti 超导的应用前景以及我国 NbTi 超导材料产业化前景。NbTi 超导材料产业是 21 世纪的朝阳工业,具有广阔的前景和美好的未来,应加快我国低温超导应用的步伐,促进低温超导材料的产业化和应用发展,为国民经济建设服务。

关键词: 铌钛超导材料;发展历史;应用;产业化

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2012)09-0037-05

1911 年荷兰物理学家卡莫林·昂尼斯发现汞在低温下具有零电阻的超导电性,开创了超导新纪元,为超导在电力应用上描绘了美好的前景。100 年来,人们对超导的研究从未停止。1933 年,荷兰的物理学家迈斯纳和奥森费尔德又发现了超导体的完全抗磁性,称为迈斯纳效应,成为超导磁悬浮应用的基础。1962 年剑桥大学实验物理研究生约瑟夫逊提出在超导结中电子对可以通过绝缘层形成无阻的超导电流,这个现象称作约瑟夫逊效应,成为微弱电磁信号探测和其他电子学应用的基础。超导现象自从被发现以来,就以其独特的魅力持续不断地吸引着广大科学家的关注,这不仅因为它能完美地展示物理学的一些重要规律,更重要的是它具有很多潜在的应用,如能源、信息、医疗、交通、国防、科学研究及国防军工等重大工程,被誉为 21 世纪具有战略意义的高新技术^[1-2]。

100 年来超导研究历史伴随着超导材料的发展,超导材料的发展是一个由简单到复杂的过程,从早期的单质、合金到一元乃至现在的多元化合物。超导材料的发展过程,本质上说也是一个临界温度不断提高的过程。人们在金属和合金、化合物和有机物等材料中也发现了超导现象,发现了一系列的超导材料。从 1911 年到 1986 年,75 年间从水银的 4.2K 提高到铌三锗的 23.22K,仅仅提高了 19K。1986 年,瑞士科学家发现铜氧化物超导体,掀起了高温超导研究的热潮,临界温度不断被突破,可以达到 150K。然而,超导发现至今,实用化的超导材料寥寥无几,脆性的

氧化物超导材料如何制成柔细的线材成为目前高温超导的瓶颈。然而,19 世纪 60 年代初期发现的 Nb-Ti 超导材料以其易加工、低成本、耐用成为最成功实用化、商业化的超导材料,在世界范围内得到了广泛应用。尤其是近年来制冷技术的发展,打破了制约 NbTi 低温超导材料应用的枷锁,极大的减少了 Nb-Ti 超导在应用过程的液氮消耗,甚至开发出了无液氮制冷技术。NbTi 超导材料已成为超导技术发展的先锋,在医疗磁共振、磁共振分析谱仪、磁悬浮、磁分选、高能物理、单晶硅生长、超导储能等各个领域得到了广泛的应用^[3-4]。

1 NbTi 超导材料概述

1.1 NbTi 超导发展历史

1962 年伯林考特和黑克发现了 NbTi 固溶合金在 4.2K 时有较好的超导性能^[5]。1964 年美国西屋电气公司首先研制出 NbTi 合金超导材料,并拉制出直径 0.635 毫米、长度 384 米的线材,展现出 Nb-Ti 合金极佳加工性能,可以大幅度降低制造成本^[6]。这种合金的上临界磁场在 4.2 K 时为 11T,临界电流密度在 4.2K@5T 时,达到 $2.0 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$,让人们看到 NbTi 超导材料在工程上的广阔应用前景。20 世纪 70 年代初期,英国帝国金属有限公司首先生产出以铜为基体的多芯复合导体,解决了单芯 NbTi 线的不稳定现象,开创了 NbTi 超导材料工程应用的新局面^[7]。现在的多芯复合 NbTi 超导体每根截面上排列数百芯乃至数万芯 NbTi 丝。在目前的超导材料

收稿日期:2012-06-25

作者简介:肖新星(1980—),女,湖南衡阳人,宝钢集团有限公司新兴产业项目组,战略寻源经理,工程师,研究方向:新兴产业技术。

市场中, NbTi 超导材料以其优异的超导性能、加工性能、及其相对低廉的成本, 已经得到了大规模应用, 其用量占整个超导材料用量的 90% 以上。

1.2 多芯复合 NbTi 超导体的结构

多芯复合 NbTi 超导体主要结构有三种, 分别是圆线(round wire)、扁带(rectangular wire)、镶嵌式扁带(wire-in-channel), 如图 1 所示。用户根据不同的用途选择不同结构的线材。NbTi 超导圆线主要应用在高场强、大电流下, 铜超比(Cu/Sc, copper-to-superconductor ratio)相对较低($\text{Cu/Sc} < 2$), 例如高能物理磁体、NMR 谱仪等。镶嵌式扁带(wire-in-channel)主要应用在 MRI 磁共振磁体中, 磁场要求

不高($< 3\text{T}$), 磁体稳定性、安全性要求高, 铜超比相对较大($\text{Cu/Sc} > 7$)。Wire-in-channel 是美国牛津公司针对 NbTi/Cu 超导复合材料的低成本化所研制, 并在世界范围内得到了广泛的应用^[8]。Wire-in-channel 结构 NbTi/Cu 超导线是通过锡焊将 NbTi/Cu 超导线与设计的铜槽相结合, 其最大的特点在于可以通过设定固定的 NbTi/Cu 超导芯丝结构, 大大减少了铜基体材料的加工量, 生产效率高、成本低。NbTi/Cu 扁带(rectangular wire)主要应用在中等磁场下(如磁分选、磁悬浮等), 铜超比范围一般在 4~10 之间。

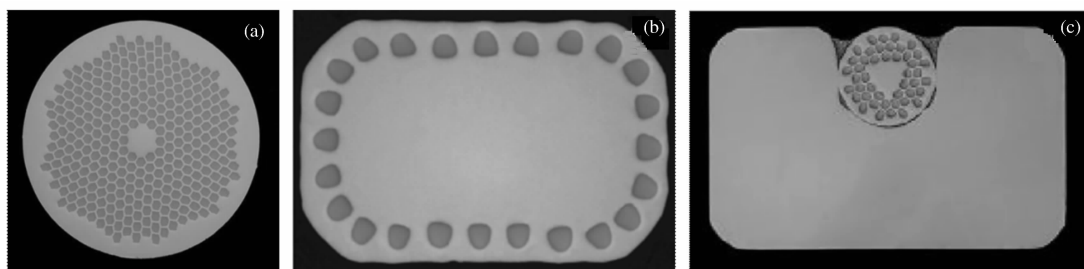


图 1 多芯复合 NbTi 超导体的三种不同截面形貌(courtesy Bruker EAS)

(a)圆线(round wire), (b)扁带(rectangular wire), (c)镶嵌式扁带(wire-in-channel)

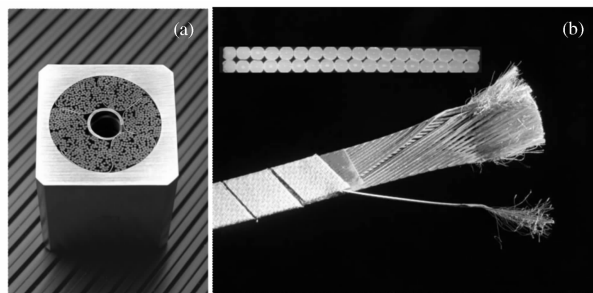


图 2 NbTi 超导电缆的两种典型结构

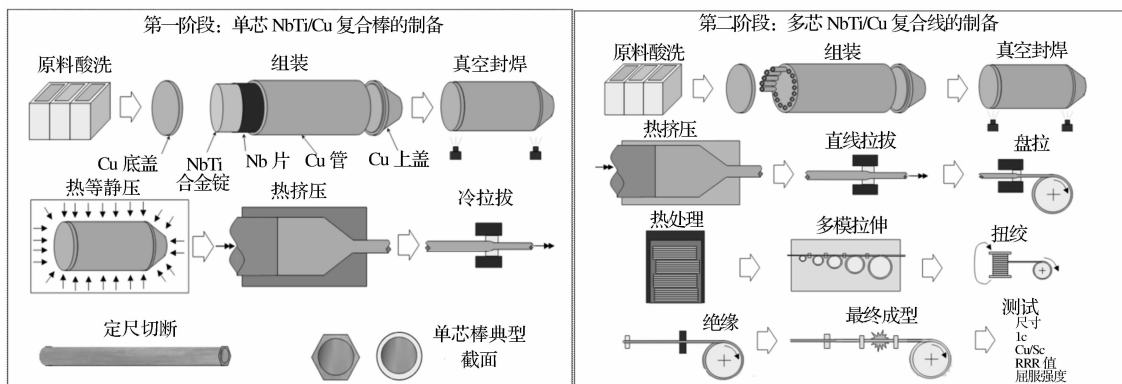
(a)CICC 导体(b)Rutherford cable(courtesy Luvata)

此外, 除了单根的多芯复合 NbTi 超导线材外, 与普通的导体材料一样, 为了承载更大的电流, 也可将多芯复合 NbTi 超导线进行绞缆。图 2 展示了两种不同结构的 NbTi 超导电缆, 分别是 CICC 导体(cable-in-conduit conductors, 铠装电缆导体)和 Rutherford 电缆(卢瑟福电缆)^[9]。NbTi-CICC 导体主要应用在大型高能物理磁体中, 如 ITER 的极相场线圈(poloidal field)就是采用的 NbTi 的 CICC 导体^[10]。Rutherford 电缆就是截面被展平成矩形的换位单层电缆, 在高能物理磁体也有着广泛的应用, 如 LHC 就采用了大量 Rutherford 结构的 NbTi 超导电缆^[11]。此外, Rutherford 结构的 NbTi 电缆在超导储

能上也得到了应用。

1.3 多芯复合 NbTi 超导体的制造工艺

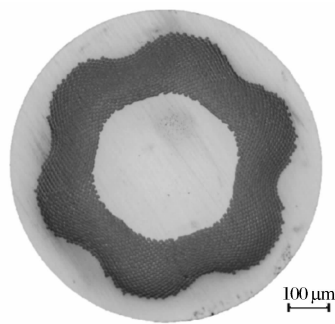
多芯复合 NbTi 超导体的典型的制备工艺主要通过两个阶段的生产流程如图 3 所示, 第一阶段是 NbTi/Cu 单芯棒的制备, 将酸洗好的原材料(Cu 包套组件、NbTi 合金锭、Nb 片)组装好后, 经过真空封焊、热等静压、热挤压、冷拉拔至设计尺寸后定尺切断得到第二个流程所需的 NbTi/Cu 单芯棒。第二阶段将 NbTi/Cu 单芯棒与铜包套组装, 同样经过真空封焊、热挤压制得多芯的 NbTi/Cu 复合棒, 通过直线拉伸、盘拉工序使得材料截面面积减小, 再经过 3~6 次的热处理, 再通过多模拉伸进一步实现线材的减径, 达到一定尺寸后在通过扭绞、拉伸后进行绝缘处理, 最终成型后制得成品。为了减少多次挤压带来的原材料损耗, 降低成本, 对于少芯丝(< 60)的 NbTi 超导材料也可以采用小尺寸的 NbTi 棒直接插入多孔铜锭中, 减少了单芯 NbTi 棒的制备工序、缩短了制备周期、提高了效率、节省了成本。对于超细芯丝的多芯 NbTi 超导材料, 也可以采用多次组装的工艺^[13], 将 114 支 199 芯的多芯复合棒复合, 可以制备 $199 \times 114 = 22686$ 芯的 NbTi 超导材料, 其芯丝直径可以达到 2.6 微米左右。

图3 多芯复合 NbTi 超导体的制造工艺^[12]

2 NbTi 超导材料在中国的发展历史

我国自 1964 年即开始研制 NbTi 低温超导材料^[5,14]。1965 年中国科学院物理研究所与武汉 712 所合作,设计研制一台 20KW 超导电机,其转子线圈采用我国宝鸡有色金属加工研究所研制的单芯 NbTi 超导线绕制。1970 年,宝鸡稀有金属加工研究所(现西北有色金属研究院)根据西南核物理研究院为研制超导磁镜等离子体实验装置的要求,研制生产了 1 800Kg 的 NbTi/Cu 单芯复合线。线材平均长度达到 5 000m,最长达 20 000m 以上。长线临界电流密度 J_c 高达 $1.0 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (@2T, 4.2K),批量生产的单芯线性能达到国外同类产品水平。1971 年又开展 NbTi/Cu 多芯复合线的研究。1973 年中国科学院电工研究所根据当时我国高能物理研究建造质子同步加速器的规划,开展了加速器用的超导二极磁体及高能探测器用的超导磁体等的研究与试制,采用宝鸡有色金属加工研究所研制的 NbTi 超导线,绕制了两个二极磁体以及研制了孔径分别为 10cm 和 35cm 的低温稳定超导磁体。北京有色金属研究总院和北京大学等曾研制一个磁场强度达 6T 的高梯度磁分离装置,并进行赤铁矿的分选实验。北京大学和北京自动化研究所还研制一台具有 10cm 口径、中心磁场约 5T 的超导磁分离装置,用于金刚石尾矿的分选实验。20 世纪 70 年代我国在超导应用的研究对我国 NbTi 超导导线的发展起到很好的推动作用。到 80 年代初我国 NbTi 超导材料研制和生产已具有一定能力。据统计,到 1982 年国内生产各品种的 NbTi 材料约 4t。我国生产的 NbTi 线单根长度已可达 20 000 米, NbTi/Cu 多芯复合线短样临界电流密度人最高达 $3.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (@5T, 4.2K) 处于世界前沿水平,性能已达到或超过国外生产的 Nb-Ti 超导线的水平^[15-16]。

然而,与国外 20 世纪 80 年代 NbTi 超导材料产业化的兴起相反,自 1986 年高温超导体发现以后,我国主要超导材料研究队伍都转向从事高温超导材料的研究,低温超导材料研究和产业化基本上处于停顿状态,仅有西北有色金属研究院还在坚持研制。1993 年他们进行 NbTi/CuNi-Cu 极细芯复合超导线的研究,1995 年研制出芯径为 1 微米、线径为 0.17 毫米、长近千米的极细芯复合超导线;并在此基础上研制出芯径达 0.46 微米、芯数为 24 462、临界电流密度达 $1.9 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (@5T, 4.2K) 的交流用 NbTi 三元合金线^[17]。2003 年,西部超导材料科技有限公司的注册成立开启了中国超导材料产业化的新纪元^[18]。西部超导依托中国参与国际大科学工程项目——ITER 项目(国际热核聚变实验堆)的机遇,在西北有色金属研究院的基础上成立的国内技术先进、规模化的超导材料高新技术企业,代表我国政府为国际热核聚变反应堆 ITER 项目提供 150 吨 NbTi 超导线材,图 4 即为西部超导为 ITER 提供的 NbTi 超导线的截面照片。

图4 西部超导生产的 ITER 用 NbTi 超导材料截面^[19]

3 NbTi 超导材料的应用前景

超导材料以其零电阻、完全抗磁性的特点,在强调低碳经济发展的今天具有广阔的应用前景。NbTi

超导材料作为一种成熟的商品化超导材料,在世界范围内得到了广泛的应用,2011 年消耗量超过 3 000T。表 1 列出了近年来超导材料市场的变化和预测,可以看出,低温 NbTi 超导材料的产值占据了超导材料近 90% 的市场,而且以每年 5%~10% 的速度增长^[20]。

表 1 世界超导材料市场发展趋势及预测

Global Market for Superconductivity (in M€) Conectus, December 2009				
Business Field	2007	2009	2011	2013
Research and Technical Development (RTD)	660	765	845	955
Magnetic Resonance Imaging (MRI)	3300	3355	3435	3525
TOTAL OF RTD & MRI	3960	4120	4280	4480
New Large Scale Applications	65	100	155	325
New Electronics Applications	60	80	125	180
TOTAL OF EMERGING NEW BUSINESSES	125	180	280	505
TOTAL MARKET	4085	4300	4560	4985
Market Shares of LTS	4025	4205	4385	4600
Market Shares of HTS	60	95	175	385

虽然近年来高温超导的发展非常迅猛,但是 Nb-Ti 超导材料在短期内是其他超导材料无法替代的。图 5 展示了 NbTi 超导材料与其他高温超导材料的价格变化比较。NbTi 超导以其低廉的价格在相当长一段时间还具有广阔的前景。高温超导陶瓷相的特殊结构,使得其制备成本居高不下,脆性的陶瓷相给工程化应用也带来了难度,短期内的大规模应用还不现实。表 2 列出了不同应用领域要求的超导电流密度和磁场指标,可以看出在实际的工程化应用的场强背景下,NbTi 超导材料的临界电流密度($3.0\times 10^5\text{ A/cm}^2@5\text{ T},4.2\text{ K}$)具有绝对的优势,具有广阔的应用前景,尤其在医疗磁共振、工业磁分选、工业单晶生长具有绝对的优势^[21-22]。

表 2 不同应用领域要求的超导电流密度和磁场指标

应用领域	电流密度 A/cm ²	磁感, Tesla	NbTi 适用性
交流电缆	10 ⁵ ~10 ⁶	<1	★★★
超导磁共振	10 ⁵	1-7	★★★★★
超导磁悬浮	10 ⁴ ~10 ⁵	5	★★★★★
超导磁分选	10 ⁵ ~10 ⁶	2-5	★★★★★
超导 MCZ	10 ⁵	2-5	★★★★★
超导储能	10 ⁵ ~10 ⁶	5-8	★★★★★
高能物理超导磁体	10 ⁵	10-20	★★★★★
磁流体发电机	10 ⁵ ~10 ⁶	6-16	★★★★★
超导电磁弹射	10 ⁵	5-8	★★★★
超导电机	10 ⁴	2-5	★★★★
故障限流器	10 ⁵	1-3	★★★
超导变压器	10 ⁶	<2	★★★

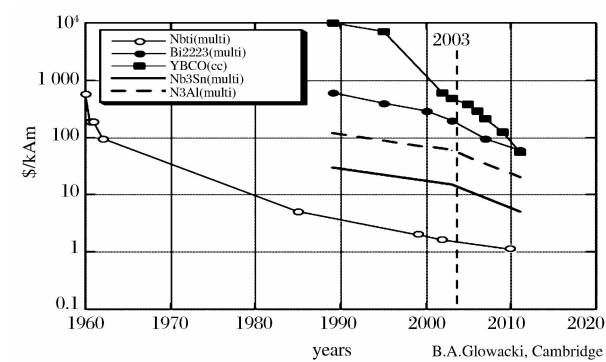


图 5 几种典型超导材料的价格变化趋势

4 NbTi 超导材料的产业化分析

近年来,随着中国经济实力的增强,国家对低碳经济、和谐社会的发展需求,超导技术的应用和产业化迅猛发展,极大的促进了各超导技术应用企业对超导材料的需求,尤其是医用核磁共振、磁分选、超导磁控单晶硅直拉、高能物理上的长足发展,对 NbTi 超导材料的需求十分迫切。

据不完全统计,目前涉及超导磁共振(MRI)系统生产的本土企业已超过 10 家,如上海美时医疗、上海联影医疗、上海卡福勒、南京丰盛超导、苏州安科、北京汇影医疗、北京万东医疗、辽宁开普医疗、东软医疗、宁波鑫高益等。此外还有医疗设别三大垄断企业 GE healthcare、Philips、Siemens 均有在中国设立制造基地。仅医疗超导磁共振一个领域就展现出了巨大的需求。2011 年,超导磁共振消耗 NbTi 超导材料约 300T,预计到 2015 年将超过 600 吨,到 2018 年将超过 1 000 吨。

在超导磁共振分析谱仪(NMR)也有了产业化的希望,2010 年 12 月 13 日,由金山研究(大连)核磁共振科技有限公司和中国科学院武汉物理与数学研究所合作,成立了中科金山武汉核磁共振科技有限公司,开始生产 500MHz 核磁共振波谱仪。超导磁共振分析谱仪的垄断企业安捷伦(Agilent Technologies, Ltd.)也有中国制造的设想。

在磁分选领域,产业化也已初显。潍坊新力超导磁电科技有限公司与中科院高能物理研究所共同开发超导磁选机、超导污水处理等项目被列入潍坊市重大发展合作项目,该项目总投资 3 亿元,一期工程投资 6 000 万元,现已具备商业化生产的能力。抚顺隆基磁电设备有限公司与中科院电工所联合研制超导高梯度磁分离机,适用于微细粒级弱磁性和顺磁性物料的分选,主要用于高岭土等陶瓷原料的提纯、煤脱硫、污水处理等。

在大规格单晶硅(300mm 以上)是我国信息电子、太阳能光伏产业发展的一大软肋。超导磁控单晶硅直拉设备(MCZ)成为制约我国单晶硅产业升级的瓶颈技术,已被列入“十二五”规划重点开发项目。目前,光伏设备制造的龙头企业北京京运通已在积极开发,在不久的将来超导 MCZ 的国产化将助推我国信息电子、太阳能光伏产业的再一次腾飞。

高能物理是一个国家科技水平发展的标志,近年来北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)、上海同步辐射光源(SSRF)、加速器驱动次临界洁净核能系统(ADS)、中国散裂中子源等高能物理的国家大型项目的启动更是进一步推动了 NbTi 超导材料的市场需求。此外,还有在 ITER 项目点火成功后,在中国建立的热核聚变反应堆,更是为中国 NbTi 超导材料的产业化描绘了美好的蓝图。

除了上述已初具产业化规模的 NbTi 超导材料应用领域,NbTi 超导材料在超导储能、超导磁悬浮也展现了极大的潜力。日本以 NbTi 超导材料为基础的山梨实验磁悬浮已经取得圆满成功,日本东海旅客铁道公司以 2027 年投入运营为目标,正围绕磁悬浮中央新干线加快商业运营的技术开发^[23]。

从上述分析不难看出,随着综合国力的增强、科技的发展,中国对 NbTi 超导材料的需求将在未来五年内呈现出爆发式的增长。据业内人士预测,到 2020 年中国 NbTi 超导材料的需求将超过 2 500 吨,产值超过 20 亿人民币。然而,目前国内具备 NbTi 超导材料生产的企业仅仅西部超导一家,目前其产能在 100T/年远远不能满足市场的需求,大量的 NbTi 超导材料目前还需要依赖进口,严重制约了我国超导产业的发展。NbTi 超导材料产业是 21 世纪的朝阳工业,具有广阔的前景和美好的未来。

5 展望

NbTi 超导材料以其易加工、低成本、耐用成为最成功实用化、商业化的超导材料,在世界范围内得到了广泛应用,是未来低碳社会发展中具有战略意义的高技术材料。我国 NbTi 超导材料的产业化进程已难以满足未来超导技术产业化发展。超导材料产业是 21 世纪的朝阳工业,正处于欣欣向荣的成长时期,超导材料产业的建立对我国科技进步、经济发展都具有重要意义,应加快我国低温超导应用的步伐,促进低温超导材料的产业化和应用发展,为国民经济建设服务。

参考文献

[1] 周青春,甘子钊. 超导:21 世纪的战略高技术——访“超导科

- 学技术”项目组[J]. 中国新技术新产品精选,2005(4):49—50.
- [2] 王少刚. 超导应用的经济前景[J]. 新材料产业,2004(7):72—77.
- [3] 李建峰,张平祥,刘向宏,等. 磁体用 NbTi 超导体的研究进展[J]. 材料导报,2009,23(2):90—93.
- [4] 李想. 我国超导材料发展快步走向实用产业化[J]. 稀有金属快报,2006(5):45—46.
- [5] 王中兴. 铌—钛超导合金[M]. 北京:冶金工业出版社,1983.
- [6] D A CARDWELL, D S GINLEY. Handbook of Superconducting Materials[M]. London:Institute of Physics Publishing,2003.
- [7] H HILLMANN. Relationship between defect structure, flux-line lattice, and metallurgical treatment in highfield superconductor NbTi[C]. Proceedings of the 1972 Applied Superconductivity Conference, 1972, 429.
- [8] THOMAS, ADRIAN MARK. Wire-in-channel superconductor[P]. US patent, 2009,014,316.
- [9] MARTIN N WILSON. NbTi superconductors with low ac loss: A review[J]. Cryogenics,2008,48:381—395.
- [10] 滕玉平,魏周荣,张应俊,等. 国际核聚变装置用超导电缆绞缆技术优化研究[J]. 电线电缆,2011(4):8—10.
- [11] L ROSSI. The LHC superconducting magnets[C]. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference,2003:141—143.
- [12] P J LEE, D C LARBALESTIER. Fabrication methods-1. BCC Alloys Composite Superconductors[M]. New York: Taylor & Francis,1994:237—258.
- [13] R M SCANLAN. Evaluation of various fabrication techniques for fabrication of fine filament NbTi superconductors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1987(2):1719—1723.
- [14] 林良真. 我国超导技术研究进展及展望[J]. 电工技术学报,2005,20(1):1—7.
- [15] HAN S. Development on superconductivity in China[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1981, 17(5):1831—1835.
- [16] LI CHENGREN, D C LARBALESTIER. Development of high critical current densities in niobium 46.5 wt% titanium [J]. Cryogenics, 1987,27(4):171—177.
- [17] L G YAN, L Z LIN. Recent progress of applied superconductivity in China[J]. Cryogenics, 1995,35(12):843—851.
- [18] 汪京荣. 实用超导材料研发和生产基地——西部超导材料科技有限公司[J]. 稀有金属材料与工程,2003(5):351.
- [19] 张平祥,李建峰,唐先德,等. 国际热核聚变(ITER)用低温超导导线研究进展[J]. 中国材料进展,2009,28(4):10—15.
- [20] JACK MCCALL. Superconductor Utility Applications Grow Steadily Worldwide[J]. NEMA electroindustry,2011(9):18.

(下转第 97 页)

政策,充分发挥各地人才、地理、资源优势,不断缩小高技术产业地区发展差距。为了促进西部地区高技术产业的发展,应加大对航空航天制造业的投入,包括资金投入、研发投入、技术投入和专业人才投入。

其次,各地区应充分发挥高技术产业优势行业。根据以上分析结果,东部地区应充分发展电子及通讯设备制造业、电子计算机及办公设备制造业、医疗设备制造业及仪器仪表制造业,尤其要重视电子计算机及办公设备制造业的发展;中部地区需要优先考虑医药制造业的发展;经济欠发达的西部地区要充分利用政府的扶植政策,重点发展航空航天制造业。

参考文献

[1] 陈正伟. 我国高技术产业对经济贡献的特征分析[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2006(5):509—515.

[2] 张磊,蒋义. 高技术产业与经济增长关联性的实证分析[J]. 企业技术开发,2007(4):67—69.

[3] 吴敏,李丹. 四川省高技术产业贡献度的实证分析[J]. 科技进步与对策,2009(14):40—42.

[4] 卜洪运,吕俊杰. 我国高技术产业界定方法的研究[J]. 技术经济与管理研究,2003(1):80.

[5] 赵玉林,魏芳. 高技术产业发展对经济增长带动作用的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究,2006(6):44—54.

[6] 陶良虎,张翼. 高技术产业对湖北工业增长贡献度的实证研究[J]. 湖北行政学院学报,2007(5):59—62.

[7] 金洪. 中国高技术产业发展实证研究——基于 1995—2003 年的数据[J]. 山西财经大学学报,2008(3):45—49.

Empirical Research on the Contribution of Chinese High-tech Industry:
Based on the Data from 1995 to 2010

LI Lan-fang

(Business School, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Using the high-tech industry and its sub-sectors data from the Statistical Yearbook of China's high-tech industry and the China's Statistical Yearbook (1995—2010), this paper empirically analyze the contribution of high-tech industry' five sub-sectors to the high-tech industries in the respective regions (the eastern region, the central region and the western region). Studies have shown that, in different regions, the contribution of high-tech industry' five sub-sectors varies and high-tech industries have different dominant industries. Finally, some policy recommendations are proposed.

Key words: high-tech industry; contribution; the ols regression

(上接第 41 页)

[21] C H ROSNER. Emerging 21st century markets and outlook for applied superconducting products[J]. Advances in cryogenic engineering, 1998, 43(A): 1—24.

[22] J W BURGOYNE. Advances in superconducting magnets for commercial and industrial applications[J]. Applied Superconductivity, 2000, 10(1): 703—709.

[23] KOICHI SUEHIRO,周冬妍. 日本超导磁悬浮列车的技术开发[J]. 国外铁道车辆, 2010, 47(4): 1—5.

NbTi Superconductors and their Industrial Prospects

XIAO Xin-xing

(Project Manager Emerging Industry, Baosteel Group Corporation, Shanghai 201900, China)

Abstract: Superconducting technology is considered as a great strategic high-tech in 21st century. NbTi superconductors as commercial superconducting materials have been nearly 30 years of history. This paper introduces the development, structure, and manufacture of the NbTi superconductor briefly. The history of the NbTi superconductors in China has been reviewed. Moreover, the further application and industrial prospects of NbTi superconductors in China has been analyzed. NbTi superconductors industry is the 21st century sunrise industry, and has broad prospects and a better future. To serve national economic construction, the pace of China's NbTi superconductors applications should be accelerated, and the industrialization of NbTi superconductors should be promoted.

Key words: NbTi superconductors; development; application; industrial prospects