

第 2 代高温超导 YBCO 涂层导体的发展及其应用

马衍伟 肖立业

(中国科学院电工研究所应用超导实验室, 北京 100080. E-mail: ywma@mail.iee.ac.cn)

摘要 上世纪 90 年代末, 随着第 1 代高温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研究, 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. 从应用角度讲, 高温超导带材必须达到以下几方面的要求: 可靠性高、成本低廉、柔性强度好以及较低的交流损耗, 才能被市场所接受. 第 1 代高温超导材料还很难满足上述条件, 因此, 第 2 代高温超导体——YBCO 涂层导体成为目前各国竞相研究开发的焦点. 简要叙述了高温超导材料的发展现状及其在强电技术方面的应用, 重点评述了 YBCO 涂层带材的制备工艺及发展趋势.

关键词 高温超导 YBCO 涂层带材 铋系 应用

1986 年, 瑞士的 Bednorz 和 Müller 发现氧化物超导体 ($T_c = 35\text{ K}$) 后, 在全世界掀起了研究高温超导性的热潮. 此后, 人们发现了超导转变温度在液氮温度 (77 K) 以上的高温超导氧化物, 如 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO), $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO) 等, 目前汞系氧化物超导体的转变温度已经高达 130 多 K. 由于高温超导体的临界温度较高, 用液氮冷却, 价格便宜, 操作方便, 是具有实用意义的超导材料. 因此, 在基础研究的同时, 世界各国在这些超导材料的实用化研究方面, 投入了大量的人力物力. 特别是 20 世纪 90 年代后期以来, 随着 Bi 系高温超导材料产业化技术取得重大突破, 第 1 代高温超导带材很快进入了商业化阶段, 发达国家政府和跨国公司大规模地开展了超导应用技术研究, 大部分应用产品已开发出样机, 并进行了应用试验. 目前, 正进一步加大投入, 开始了以第 2 代 YBCO 高温超导材料实用化为目标的新一轮研究与开发. 本文将简述近期在高温超导材料实用化研究方面的最新进展、制备方法及应用前景.

1 实用化高温超导体的要求

(1) 传输载流能力 对强电应用领域来说, 超导导线带材必须具有较高的工程临界电流密度 J_e (临界电流与超导体的整个横截面之比). 根据应用场合的不同, J_e 值的要求也不同, 如在 77 K 下, J_e 应满足 $10^3 \sim 10^5\text{ A/cm}^2$. 对于在 $0.5 \sim 10\text{ T}$ 磁场范围内运行于 $20 \sim 77\text{ K}$ 温度区间的超导设备器件, 所需的超导材料应具有更高的 J_e 要求.

(2) 交流损耗 强电应用要求高温超导体应具有较小的交流损耗, 以减少它的运行成本, 提高设备

的安全性. 高温氧化物超导材料为层状结构, 具有明显的各向异性, 且具有颗粒特性, 存在着大量的弱连接, 使得高温超导体的交流损耗与传统超导体有很大差别^[1,2], 如在垂直于磁场的情况下, 交流损耗和超导体的尺寸 (如带材的厚度等) 成正比. 虽然经过大量研究, 多芯铋系超导线材的交流损耗有较大幅度的降低, 但仍然不能满足交流导线的要求 ($< 0.25\text{ mW} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$). 相对来讲, YBCO 由于其超导层较薄, 在经尺寸的优化处理后, 交流损耗得到极大地降低, 很有希望用作交流导线.

(3) 导电稳定性 由于其很强的非线性, 高温超导材料一旦过载, 将会出现烧掉导线的事故^[3]. 为避免此种情况的发生, 超导层外面一般需配置一层具有良好导热性的铜或不锈钢作为稳定层或保护层 (bypass).

(4) 机械强度 高温超导铜氧化物材料都是很脆的多元氧化物陶瓷材料, 因此, 制备得到的线带材还必须采取机械加强工艺后方可使用. 目前, 对多芯铋系超导线材用不锈钢在其两侧加固后, 其机械强度已达到 250 MPa , 最小弯曲半径已达 5 cm . 同样工艺也已应用于 YBCO 涂层带材, 例如美国超导体公司发明的中性轴导线 (Neutral Axis) 可同时解决超导层在使用过程中的受力和导电稳定性问题^[4].

(5) 价格 和传统的超导体相比, 高温超导体必须具有一定的价格优势才能被市场所接受. 目前, 对超导磁体来说, 铜导体的性价比为 $10 \sim 25\text{ } \$/(\text{kA} \cdot \text{m})$. 据预测, 目前已商业化的第一代铋系高温超导线材的最终市场价格为 $50\text{ } \$/(\text{kA} \cdot \text{m})$; 第 2 代 Y 系高温超导带材将为 $10\text{ } \$/(\text{kA} \cdot \text{m})$. 而铁包套的复合 MgB_2 导线的

价格可达到 1 \$(/kA·m), 与NbTi导线相当. 表 1 列出了几种超导电力设备对高温超导复合导线性能的要求^[5,6].

2 高温超导材料及发展现状

目前高温超导材料指的是: 铜系(35 K)、钇系(92 K)、铋系(110 K)、铊系(125 K)和汞系(135 K)以及 2001 年 1 月发现的新型超导体二硼化镁(39 K)^[7], 其中最有实用前途的是铋系(BSCCO)、钇系(YBCO)和二硼化镁(MgB₂).

图 1 是正在开发中的实用化超导线材示意图. 铋系列被称为第 1 代高温超导材料; YBCO被称为第 2 代高温超导材料. 作为强电应用的超导材料, 从工艺上看铋系具有一定的优势, 可以制备长达数千米的带材. 从性能上看钇系要比铋系高, 例如, 钇系薄膜的临界电流密度要比铋系超导体高出两个数量级, 但由于脆性大, 钇系材料长线的制备有很大的难度; 另外, 钇系材料同铋系材料相比还具有热导率小, 钉扎力强的特点. 钇系涂层带材质地柔软, 能经受很高的磁场, 并且带材不同部分超导性能变化很小, 其应用前景良好. 另外, 由于MgB₂成材容易, 成本低廉, 因此它很有可能成为最具潜力的新型超导材料.

2.1 第 1 代铋系高温超导带材

众所周知, 铋系 2223 或 2212 相单芯或多芯带材

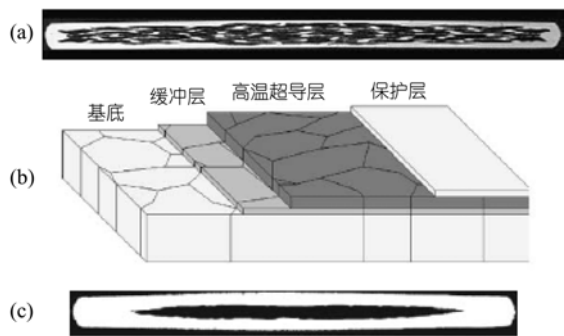


图 1 正在开发中的实用化超导线材示意图

(a) BSCCO/Ag 多芯线材, (b) YBCO涂层导体, (c) MgB₂/Fe 线材

是用粉末装管法制备的, 其工艺流程一般是先将原料粉末装入银管, 通过挤压、拉伸成型, 然后烧制. 经过十几年的发展, 利用这种方法, 已经开发出长度为千米级的铋系多芯超导线材. 现在能制备 200 m 长度, 单带临界电流最高达 145 A 的带子; 工程临界电流密度能达到 15000 A/cm²; 也能有一定的可加工性. 也就是说, 第 1 代——铋系氧化物高温超导线材已达到商业化水平. 美国、日本、德国、中国等国已具备生产几百米到几千米的批量能力, 发展水平以美国最为先进. 目前美国超导体公司已经在Devens建成了一个年产 20000 km 的生产线. 目的是大规模降低成本, 拟从目前的 100~200 \$(/kA·m)降到 50 \$(/kA·m)^[4]. 可以说, 铋系高温超导带材的J_c、长度已经基本上达到了电力应用的要求, 而其价格对于限流器应用来说也基本满足要求, 从而为开展强电应用研究奠定了基础. 超导磁体、输电电缆、超导变压器和故障限流器等一些极有价值的项目各国都已在大力开展应用研究.

然而, 铋系超导带材巨大的各向异性使得其不可逆场(77 K)只有~0.2 T, 这样就极大地限制了铋系带材的应用范围(见图 2). 换句话讲, 铋系高温超导带材在液氮温度时, 其临界电流I_c容易受到磁场的影响, 在较小的磁场下, 其I_c就急剧下降, 这对于除超导电缆以外的应用将带来严重的问题. 但是, YBCO

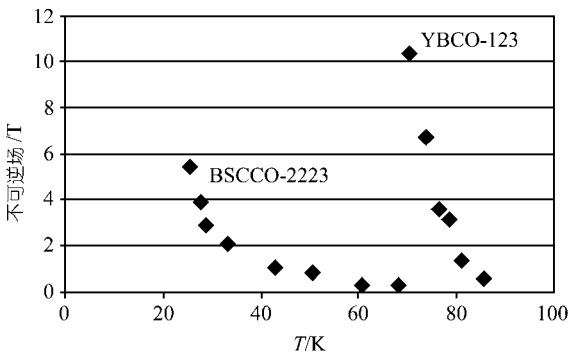


图 2 铋系和钇系超导体温度和不可逆场的关系

表 1 超导电力设备对高温超导复合导线性能的要求

应用	J _c /A·cm ⁻²	磁场/T	运行温度/K	I _c /A	导线长度/m	应变/%	弯曲半径/m	价格/\$(·kA ⁻¹ ·m ⁻¹)
限流器	10 ⁴	0.1~3	20~77	10 ³ ~10 ⁴	1000	0.2	0.1	10~100
电动机	10 ⁵	4~5	20~77	500	1000	0.2~0.3	0.05	10
发电机	10 ⁵	4~5	20~50	>1000	1000	0.2	0.1	10
储能	10 ⁵	5~10	20~77	10 ⁴	1000	0.2	1	10
电缆	10 ⁴	<0.2	65~77	100 (每根)	100	0.4	2	10~100
变压器	10 ⁴	0.1~0.5	65~77	10 ² ~10 ³	1000	0.2	1	10

超导体在液氮温度(77 K)下具有很高的不可逆场,高达 7 T,也就是说,钇系比铋系具有更好的磁场特性。此外,受原材料银金属成本的限制,铋系价格要降低到 50 \$(/kA·m)以下,已经十分困难。因此,研究开发新型高温超导材料是十分必要的。

2.2 第2代钇系高温超导带材

铋系带材的商业化同时促进了YBCO涂层导线的发展。钇系 123 结构的材料与铋系材料不同,它的超导电性的各向异性比较弱,可以在液氮温区附近较高磁场下有较大临界电流。但由于晶粒间结合较弱,难以采用包套管法制备。目前采用沉积、喷涂等镀膜方法制造的钇系超导带材,成为当前发展高温超导强电应用材料的一个主要热点。但是,高性能YBCO带材对双轴织构的微观组织有较强的依赖性,既只有在双轴织构化的基带或隔离层上,通过外延生长技术才能制备高质量YBCO。目前,已经多次在实验上证实涂层导体技术能使样品获得高 J_c 。其中大部分样品是用IBAD/PLD和RABiTS/PLD法制造的。用这两种方法制备的带材的 J_c 均可很容易达到 2 MA/cm² (77 K, 0 T)。可以说,钇系列超导带材的工作主要集中在两个方面:基板及织构化隔离层的制备和高 J_c 超导层的沉积。

(1) 基板及织构化隔离层 离子束辅助沉积 (IBAD): 1991 年由日本Fujikura发明^[9],后由美国阿洛莫斯国家实验室改进^[9]。IBAD法特点是采用高强度、非磁性Ni合金基板,通过离子束溅射而得到具有强烈织构化的YSZ层。但是其主要缺点是沉积YSZ层的工艺过程太慢,不适用于商业化。美国阿洛莫斯国家实验室正研究用快速沉积的MgO层来代替YSZ层,但效果不是很理想,因快速沉积的MgO层的织构度仍不如YSZ层。同时,日本Fujikura公司正在研究以黄绿石结构的氧化物($Gd_2Zr_2O_7$) 作为新的隔离层材料^[10]。

轧制辅助双轴织构化(RABiTS): 这是由美国橡树岭国家实验室所发明^[11]。首先利用RABiTS技术获得高质量的双轴织构的Ni基底,然后用激光融蚀法在Ni基底上沉积CeO₂膜,再在CeO₂膜上外延YSZ和CeO₂。这样多层隔离层的使用不仅增加了制作成本,同时又使制造过程复杂化,另外,轧制过程对工作环境有较高的要求。目前在开发比Ni具有更高强度、更少磁性的基带材料方面已取得较大的进展。100 m长的织构镍基带已经成功地制备出来,并且已安装了

可生产 50 ~ 100 m长带材的设备^[13]。

倾斜基板沉积法(ISD): 日本住友电力研究发现,不需要离子束辅助,沉积材料仅以一定角度沉积带金属基板上,也能获得织构化的隔离层^[12]。该法的特点是沉积速率快,但所获得的织构度并不是很高。

织构化银或银合金基板: 银是目前唯一不需要隔离层的高温超导基带材料,而且研究表明,银的掺入有利于YBCO超导性能的改善和表面电阻的降低^[14]。

(2) 高 J_c 超导层的沉积 目前已有多种方法可在金属柔性衬底上沉积高质量YBCO薄膜,这些主要方法是:激光融蚀法(PLD),金属有机化学气相沉积(MOCVD),金属有机沉积(MOD),溅射法(sputtering)。其它还有喷涂分解、溶胶凝胶法等。其中,PLD法是应用最广泛的一种沉积方法。目前,采用该法制备的YBCO短样性能已高达 400 ~ 500 A/cm宽度。但PLD法不太适合大规模产业化,主要是要使用昂贵的大功率、高真空装置以及工业用激光源。溅射法也面临高真空系统的问题。

MOCVD 法只需较低的真空系统、生长速度快、可制备长带,具有大批量生产的潜在可能,但该法均匀性有待提高,而且其先驱物-源的花费也是个问题。

从高性能、低成本及大规模产业化的角度来看,非真空TFA-MOD法正引起人们越来越多的关注。该法原理是金属基板先在含氟的涂层溶液中进行涂层,然后经两道热处理工序(见图 3),最终形成高质量Y123 膜^[15]。TFA-MOD法特点如下: (1) 工序相对简

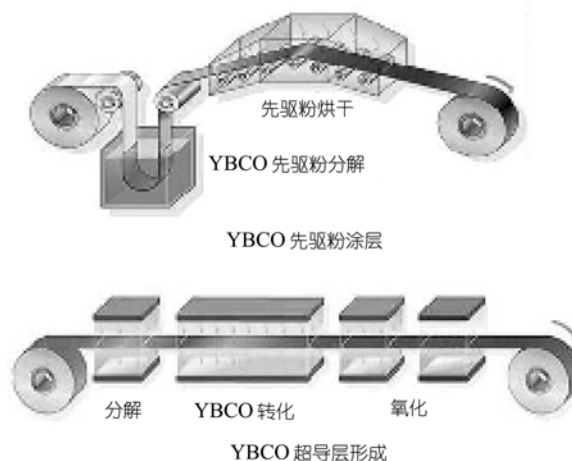


图3 金属有机沉积 MOD 法的工艺流程图(不需要真空系统)

单, 仅需涂层和退火两道工艺; (2) 先驱物原料 100% 可利用, 且成分可调; (3) 不需要真空系统; (4) 大面积沉积过程.

近年来, 采用 IBAD/PLD(MOCVD) 复合技术制备涂层带材已取得重大进展. 日本 Fujikura 公司先采用 IBAD 法在 46 m 长的基带上沉积一层 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, 再用 PLD 法以 4 m/h 的速度往返 4 次沉积了一层 1.2 μm 厚的 YBCO 超导层, 其 I_c (77 K, 0 T) 达到 74 A, 并处于世界领先地位^[10]. 美国 IGC-Superpower 公司利用 IBAD-MgO/MOCVD 法研制的 57 m 长带材, 其 I_c 达到了 105 A/cm 宽度. 德国哥廷根大学利用 IBAD/PLD 法成功制备了 10 m 长的带材, $I_c = 78$ A (77 K, 0 T), $J_c = 2.2$ MA/cm²^[13].

目前, 基于 TFA-MOD 制作成本低和生产率高的优点, 美国、日本和欧洲等发达国家都在加紧研究用非真空 TFA-MOD 法来替代 PLD 法可能性, 且进展喜人. 由于事先沉积了隔离层的基带可以批量生产, 因此, 工艺完全可以在规模化生产中采用. 其中, 2004 年 2 月美国超导体公司采用 RABiTS/MOD 法已成功研制了 10 m 长的超导带 (Ni-W 基带), 其 I_c 达到了 270 A/cm 宽度 (77 K, 0 T), 这一最新结果已接近实际应用 300 A/cm 宽度的门槛值, 而且具有很好的重复性和稳定性^[13], 因此 MOD 法具有良好的市场前景. 可以说, 钇系列超导带材的制造技术已经基本确立起来, 虽然如此, 仍有待进一步研究制造工艺, 提高技术性能, 降低成本.

日本正执行其 3000 万美元的涂层导体研制计划, 该计划的目标是在 2006 年前后生产出千米长的带材. 美国为保持其在第 2 代高温超导技术领域的领先地位, 于 2001 年推出了“加速涂层导体发展计划 (ACCI)”. 既在国家能源部的统一协调下, 几个大的国家实验室、大学和工业界如美国超导体和 IGC-SuperPower 等公司紧密合作, 产研结合, 共同从事第 2 代高温超导带材的研究开发与应用工作. 根据该计划, 到 2007 年长度为千米级的第 2 代带材将可以实现商业化, 并取代铋系超导线材而应用在机器设备上. YBCO 高温超导带材的应用预计会大幅度降低电力设备的规格, 明显提高其工作性能. 同时该计划明确提出了涂层高温超导带材的价格目标为 10 \$(/kA · m), 届时高温超导电力技术的各种应用将完全具备实用化推广的可能.

国内北京英纳超导公司和西北有色金属研究院都能生产几百米长的铋系带材, 成功地实现了我国

铋系高温超导线材的产业化. 同时我国也在加紧第 2 代高温超导带材的研制开发, 如北京有色金属研究院、中国科学院物理研究所、中国科学院固体物理研究所、西北有色金属研究院、北京工业大学等单位在基板及织构化隔离层的制备和高 J_c 超导层的沉积方面作了许多工作, 取得了一定成果, 如经离子轰击消除基片氧化层后, 用 PLD 沉积过渡层 CeO_2 和 YSZ, 再用 PLD 沉积 YBCO 超导层, $J_c = 1.5 \times 10^6$ A/cm² (77 K, 0 T); 另外, 采用 TFA-MOD 工艺在 LaAlO_3 基片上涂复 YBCO 超导层, 其 J_c 达到 1.5×10^6 A/cm² (77 K, 0 T). 目前正在执行国家的“十五”项目, 计划制备出米级长度的 YBCO 超导带材, 性能达到国际先进水平.

2.3 二硼化镁

2001 年 1 月, 日本 Akimitsu 等人发现的临界转变温度为 39 K 的 MgB_2 超导体^[12], 引起了全世界的广泛关注. 由于 MgB_2 成材容易, 成本低廉, 因此它很有可能成为最具潜力的新型超导材料. MgB_2 的最大优势在于可以在更高的温度 (20 ~ 30 K) 下应用, 而低温超导体在这一温区无法工作, 这个温区用微型制冷机就能够容易获得而无需复杂和昂贵的液氮. 用粉末装管法生产的 MgB_2/Fe 线材, 在 4.2 K, 0 T 时, J_c 达到 10^6 A/cm²; 在 4.2 K, 6.5 T 时, J_c 达到 10^4 A/cm²^[16]. 目前研究工作的重点是努力提高 MgB_2 的不可逆场和高场下的临界电流密度.

3 应用市场展望

高温超导材料在 20 世纪 90 年代得到迅速发展, 已开始进入实用阶段. 显示了其旺盛的生命力. 预测到 2020 年全部超导产品中, 高温超导约占 60% ~ 70%. 目前尽管高温超导在技术上和投资上仍存在问题, 但它以比液氮便宜 50 倍的液氮为工作介质, 具有低温超导无法企及的优点, 其在电力设施和能源系统中的应用已接近实现产业化. 未来的十年是高温超导市场发展和材料产业化的十年. 随着第 2 代高温超导带材在 5 ~ 10 年内的商业化, 以之为基础的超导市场将会出现一个快速增长的时期. 据最新 2002 年美国“高温超导材料市场分析与预测报告 (Future Price and Markets for HTS)”, 全世界高温超导元器件将会由 2010 年的 5 亿美元的市场规模激增到 2020 年的 100 亿美元^[17]. 在高温超导电力技术商品化领域, 最早进入应用的可能是故障限流器. 增幅最快的将是超导电动机, 其市场占有率会有 2006 年的 1% 快速增长到 2020 年的 79%. 到 2020 年, 其它超导电力设

备的市场占有率分别是: 超导变压器(76%), 超导发电机(50%)以及输电电缆(80%). 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, 具有广阔的市场前景. 超导技术将主要应用于以下方面, 从中可以看出, 超导技术的应用显示出巨大的优越性:

能源(超导输电、超导储能、超导电机、超导限流器等): 这是基于超导体的零电阻效应显示了其无损耗输送电流的性质, 大功率发电机、电动机如能实现超导化将会大大降低能耗, 并使其小型化. 这样不仅运动特性大为改善, 而且由于结构紧凑而有减低成本明显效果, 综合经济特性优良. 随着实用高温超导材料的研究取得重大进展, 作为应用超导技术最重要的组成部分高温超导电力技术的实用化已成为现实. 目前, 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, 高温超导储能系统也有相应的实验样机问世.

交通和国防技术(磁悬浮列车、船舶磁推进器、超导反潜、扫雷、飞船再入、电磁推进、通讯及制导等): 利用超导磁体磁场强、体积小、重量轻的特点, 可用于负载能力强、速度快的超导悬浮列车和超导船. 若将超导体应用于潜艇的动力系统, 可以大大提高它的隐蔽性和作战能力.

其他如医疗卫生(核磁共振成像、生物磁仪器等), 重大科学工程(加速器、受控热核装置等). 根据高温超导体可以在液氮温区工作的特点, 科学家们开发了一些新的应用方向, 如用高温超导体的块材制成高温超导永久磁体, 与半导体集成器件结合的高温超导微波器件, 核磁共振的探测线圈等. 作为一种物质存在的形态, 超导电现象的应用现在还是刚刚开始, 还会有许多现在未被预见到的应用的可能, 在社会及经济发展中将会产生重大的作用.

4 结论

采用粉末装管法, 制备第一代高温超导材料的技术已经比较成熟, 已达到商业化水平. 但由于其在液氮温区的磁场性能较差, 而且受原材料成本的限制, 其价格要降低到 50 \$(/kA · m) 以下, 已经十分困难, 这样就极大地限制了铋系带材的应用范围. 因此, 研究开发新型高温超导材料是十分必要的.

作为第二代超导体的 YBCO 涂层导体, 是目前高温超导带材发展的重要方向. 大量的工作集中在批量生产低成本的超导涂层实用工艺开发上, 重点在高双轴取向的基板或隔离层的制备以及提高超导

带的临界电流密度等方面. 二硼化镁可能成为最具潜力的低成本超导体, 但它的应用范围限制在 20~30K 温区.

在今后 10 年或略长一些时间内, 超导技术将会成为一门有较大规模的高技术产业. 另外, 我国的能源、医疗卫生、电子技术和科学仪器等方面将会迫切需要超导技术. 能否抓住超导技术发展提供的这次历史性的机会、争取在这一新兴高技术产业中占有一席之地, 是我国超导技术发展面临的一个重要问题.

参 考 文 献

- 1 张国民, 林良真, 肖立业, 等. 高温超导带材的交流损耗. 低温与超导, 2001, 29(3):
- 2 胡立发, 张平祥, 王金星, 等. 高温超导体中的交流损耗. 低温与超导, 2000, 28(4): 24~31
- 3 Paul W, Chen M, Lakner M, et al. Fault current limiter based on high temperature superconductors—different concepts, test results, simulations, applications. Physica C, 2001, 354: 27~33
- 4 Malozemoff A P, Verebelyi D T, Fleshler S, et al. HTS Wire: status and prospects. Physica C, 2003, 386: 424~430
- 5 Service R F. MgB₂ trades performance for a shot at the real world. Science, 2002, 295: 786~788[DOI]
- 6 Larbalestier D C, Gurevich A, Feldmann D M, et al. High-Tc superconducting materials for electric power applications. Nature, 2001, 414: 368~377[DOI]
- 7 Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T, et al. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. Nature, 2001, 410: 63~64[DOI]
- 8 Iijima Y, Tanabe N, Kohno O, et al. In-plane aligned YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films deposited on polycrystalline metallic substrates. Appl Phys Lett, 1992, 60: 769~771[DOI]
- 9 Wu X D, Foltyn S R, Arendt P N, et al. Properties of YBa₂Cu₃O_{7-x} thick films on flexible buffered metallic substrates. Appl Phys Lett, 1995, 67: 2397~2399[DOI]
- 10 Kakimoto K, Iijima Y, Saitoh T, Fabrication of long-Y123 coated conductors by combination of IBAD and PLD, Physica C, 2003, 392: 783~789
- 11 Goyal A, Norton D P, Budai D J, et al. High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of YBa₂Cu₃O_{7-x} thick films on biaxially textured metals. Appl Phys Lett, 1996, 69: 1795~1797[DOI]
- 12 Malozemoff A P, Second generation HTS wire: an assessment, Report of American Superconductor Corporation. 2004. 1~24
- 13 Ohmatsu K, Muranaka K, Hahakura S, et al. Development of in-plane aligned YBCO tapes fabricated by inclined substrate deposition. Physica C, 2001, 357: 946~951
- 14 Ma Yanwei, Watanabe K, Awaji S, et al. Jc enhancement of YBa₂Cu₃O₇ films on polycrystalline silver substrates by metalorganic chemical vapor deposition in high magnetic fields. Appl Phys Lett, 2000, 77: 3633~3655[DOI]
- 15 Araki T, Hirabayashi I. Review of a chemical approach to YBa₂Cu₃O₇ coated superconductors-metalorganic deposition using trifluoroacetates. Supercond Sci Technol, 2003, 16: R71~94[DOI]
- 16 Flukiger R, Suo H L, Musolino N, et al. Superconducting properties of MgB₂ tapes and wires. Physica C, 2003, 385: 286~305
- 17 Lawrence L R, Cox C, Hamrick J, et al. High temperature superconductivity: The Products and Benefits. Report of Bob Lawrence & Associates Inc, 2002. 1~51

(2004-05-08 收稿, 2004-09-28 收修改稿)