

特约专栏

涂层导体在北京有色金属研究总院的研究进展

杨 坚

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘 要: YBCO 涂层导体即第二代高温超导带材, 是实用化超导材料研究领域的热点。介绍了北京有色金属研究总院多年来在涂层导体制备技术方面所从事的研究工作, 包括立方织构金属基带、隔离层、YBCO 涂层的研究以及自主研发了多台连续的动态真空镀膜装置, 例如磁控溅射、电子束蒸发、脉冲激光等。列举了所承担的科技部“863”和“973”计划课题, 涉及涂层导体研究工作的内容和取得的阶段成果。最后, 展示了目前拥有的实验设施, 掌握的制备技术, 达到的技术水平和获得的专利。

关键词: 涂层导体; YBCO; 金属基底; 隔离层; 立方织构

中图分类号: TM26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)03-0028-07

Research Progress for Coated Conductors in GRINM

YANG Jian

(General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: Research work concerning fabrication technique of coated conductor made in General Research Institute for Nonferrous Metals (GRINM) has been introduced. Projects undertaken of the National High Technology Research and Development Program (863 Program) and the National Basic Research Program of China (973 Program) supported by the Ministry of Science and Technology (MOST) have been listed. Main research activities and achievements in coated conductor have been described, and the research facilities, techniques and patents owned by GRINM have been laid out.

Key words: coated conductor; YBCO; metal tape; buffer layer; cubic texture

1 前 言

北京有色金属研究总院自九五期间就开始涂层导体即第二代高温超导带材的研究工作, 参加由国家超导技术联合研究开发中心统一协调管理的国家“863”、“973”项目, 是国内最早从事涂层导体研究工作的单位之一。“十五”、“十一五”期间, 又联合其他单位共同承担“863”和“973”关于涂层导体的研究项目。

主要工作包括立方织构金属基带的研究, 隔离层的研究, YBCO 涂层的研究以及实验装置的研发。采用轧制和再结晶热处理的方法制备出具有高立方织构的镍基带, 并在国内首先制备出立方织构的无磁性 CuNi 合金基带; 采用多种方法研究开发在金属基带上生长氧化物隔离层及 YBCO 超导层的技术。

用射频磁控溅射的方法研究在金属基底上外延生长 CeO_2 , YSZ 组合隔离层, 并在此基础上用直流磁控溅射制备 YBCO 膜; 用磁控溅射方法制备 MgO , CeO_2 组合隔离层, 改善了隔离层表面形貌; 开展表面氧化外延 (SOE) 在 Ni 基底上外延生长 NiO 隔离层的研究, 在非真空加热炉中金属镍自氧化生长 NiO 种子层, 研究了生长工艺及基底织构和表面状态对 NiO 立方织构形成的影响。制备出的 NiO 具有高度立方织构, 以 NiO 为种子层, 并在其上制备其他隔离层和 YBCO; 电子束蒸发快速生长 YSZ 隔离层; 化学溶液法探索简便易行的隔离层制备方法等。用真空方法在小样上对 YBCO/ CeO_2 /YSZ/ Y_2O_3 /Ni 结构进行了研究, 进而采用磁控溅射法研制 CeO_2 /YSZ/ Y_2O_3 /NiW 隔离层长带; 脉冲激光沉积技术在 CeO_2 /YSZ/ Y_2O_3 /NiW 上研究高性能 YBCO。全方位开展了涂层导体的研究工作, 不仅取得一系列进展, 明晰了涂层导体的基本特性, 而且为进一步的研究和工程开发奠定了坚实基础。

2 承担国家项目

北京有色金属研究总院九五期间承担国家“863”计

收稿日期: 2011-01-15

基金项目: 科技部 863 计划项目 (2006AA03Z205, 2004AA306130, 2002AA306211, 863-CD030104); 科技部 973 计划项目 (2006CB601005, 2011CBA00105, G1999064605)

通信作者: 杨 坚, 女, 1962 年生, 教授级高工

划“超导技术”-“柔性基带制膜(863-CD030104)”子课题(1997-2000)。“十五”期间北京有色金属研究总院作为依托单位,联合清华大学、中国科学院物理研究所、中国科学院固体物理研究所和西北有色金属研究院等单位,承担国家“863”计划“第二代高温超导带材实用化技术研究”(2002AA306211, 2002-2005)课题和“10米长第二代高温超导带材的研究”课题(2004AA306130, 2004-2005);参加“十五”、“973”“高温超导带材和缆材的基础研究”(NKBRSG1999064605, 1999-2004)。“十一五”期间承担了国家“863”计划“连续制备涂层导体超导层的关键技术研究”课题(2006AA03Z205, 2006-2008);北京有色金属研究总院作为依托单位,联合北京工业大学、中国科学院物理研究所、上海大学、中国科学院物理研究所,承担了国家“973”计划课题“钇钡铜氧涂层导体基

础科学问题研究”(2006CB601005, 2006-2010)。“十二五”还将继续在“973”计划项目中(2011CBA00105)就涂层导体厚膜制备及相关基础科学问题进行研究。同时开展“YBCO 涂层导体应力和微结构的研究”(国家自然科学基金资助项目 50972019, 2010-2012)。

3 研究内容及进展

北京有色金属研究总院有关涂层导体的研究主要在轧制辅助双轴织构衬底(RABiTS)方面展开。采用轧制和再结晶热处理的方法制备具有立方织构的纯 Ni 和无磁性 CuNi 基带;采用多种手段和方法在该金属基底上外延生长了多种组合隔离层,在此基础上用直流磁控溅射和脉冲激光沉积(PLD)技术研制 YBCO 膜。图 1 给出基带、隔离层和超导层的制备过程和技术。

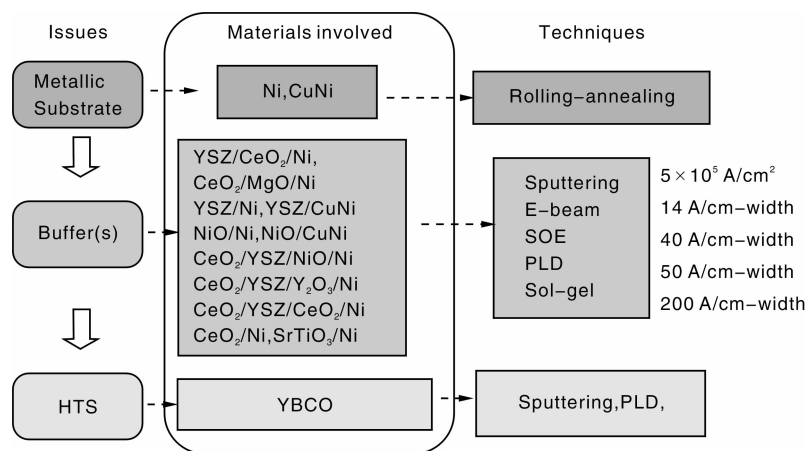


图1 涂层导体研究的基底、隔离层和超导层的制备和技术流程

Fig. 1 Preparation and technical processes of coated conductor substrate, buffer layers and the superconducting layer

3.1 金属基带的研制

3.1.1 基带织构的研究

采用轧制和再结晶热处理的方法制备出具有立方织构的纯 Ni 基带^[1],如图 2 所示。通过对不同材料和组分的金属基带的机械性能、磁性能、结构性能及物理化学性质进行分析比较,在国内首先提出无磁性、加工性能好的 Cu-Ni 合金金属基带^[2]。利用 X 射线衍射取向测定和 ODF 理论,定量分析了相应 Cu-Ni 合金及纯 Ni 基带织构。测试表明 Cu-Ni 合金及纯 Ni 基带均具有纯立方织构,其 φ 扫描半高宽 $\leq 10^\circ$ 。通过金相和扫描电镜观察晶界特征及晶界沿表面分布的特征;结合具体工艺和织构测试,对影响立方织构形成的各个因素进行了深入研究。在研制立方织构金属基带工艺中,加入锻造工序,减少金属体内缺陷,并引入超声探伤测量,监测金属体内缺陷和工艺对体内缺陷改观的影响^[3]。在此基础

上获得了立方织构度达到 99% 以上, (111) φ 扫描半高宽 $\leq 10^\circ$ ^[3-4] 的高度立方取向的镍基带和铜镍合金基带。

3.1.2 基带表面的研究^[1,5-7]

经过轧制和再结晶热处理形成的具有双轴织构的金属镍基带表面较为粗糙,平整度较差。作为衬底不利于外延生长。尝试了多种抛光方式,改善基带表面状态,包括电解抛光、化学抛光、机械抛光以及它们的组合。总结比较各种方法的优劣性,选取对长带的可操作方法,并对各种抛光工艺参数,如电解抛光的时间、电压大小、电解液的选配、机械抛光的力度、抛光液的选择、上下盘的方式等进行了大量实验。结果表明各种抛光方式对衬底的平整度都有不同程度的贡献。电解抛光基本不破坏衬底的织构,但平整度不够理想。机械抛光对衬底的整体织构没有大的损害,但对表面一层织构有损伤,从而影响了阻挡层的外延。因此采用抛光后再热

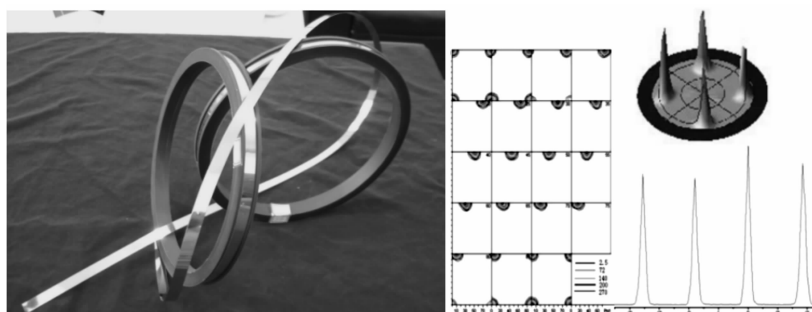


图 2 织构镍基带 φ 扫描, 2. 5D 极图, ODF 图及实物照片

Fig. 2 φ scanning, 2. 5D pole figures, ODF maps and product photos of textured nickel substrates

处理工艺可以使表面织构有所恢复。对采用电化学抛光的镍基带进行原子力显微镜观察, 结果表明, 表面粗糙度在 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 范围内小于 $10\ \text{nm}$, 明显减弱了由轧辊带来的轧制痕, 改善了表面粗糙度。通过改善轧制初始态和轧制过程及相应热处理工艺, 使金属基带晶粒细化并趋于均匀。在 $10\ \text{mm}$ 宽, $0.1\ \text{mm}$ 厚基带的内, 面外晶粒尺度达到 $30 \sim 50\ \mu\text{m}$ 。

3.2 涂层导体小样品的研究

在立方织构金属基带上, 多种制膜方法生长多层隔离层。研究隔离层与金属衬底和超导层的晶格匹配, 热膨胀的影响; 研究隔离层的织构取向; 研究氧的控制, 抑制衬底氧化, 同时形成氧化物隔离层; 研究各层的表面形貌, 消除微裂纹。

3.2.1 磁控溅射法在 Ni 基片上制备 YSZ/CeO₂ 和 YBCO 超导薄膜^[8-12]

用射频磁控溅射方法在双轴织构镍基底上外延生长 CeO₂ 缓冲层, 没有采用常规的 Ar/O₂ 溅射气氛, 而采用 Ar/H₂ 气氛。一方面降低了反应温度, 避免生成 NiO, 另一方面氢也起到还原作用。CeO₂ 具有纯 c 轴取向, ω 扫描半高宽为 5.1° , φ 扫描半高宽为 11° 。实验发现 CeO₂ 表面状态的好坏、致密程度直接影响到 YSZ 的生长状况, 进而影响 YBCO 及其临界电流。在 CeO₂/Ni 基底上用射频磁控溅射制备 YSZ 缓冲层。采用 Ar/O₂ 作为溅射气氛, 研究了基底温度和 Ar, O₂ 分压比以及总气压对 YSZ 膜取向和 NiO 生成的影响。制备出 c 轴择优取向的 YSZ 膜, 其 φ 扫描半高宽为 15° , 表明 YSZ 膜有较好的平面内取向。进一步用中空柱状靶直流磁控溅射在 YSZ/CeO₂/Ni 基片上制备 YBCO 超导薄膜。研究了 YBCO 靶超导状态与超导膜的关系, 靶材溅射环状态、溅射速率与基片温度的关系, 基片温度对 YBCO 超导膜 c 轴织构和 $a-b$ 平面内织构的影响等。研究了 $a-b$ 平面内织构与临界温度特别是临界电流密度 J_c 的关系。

研究了基片平整度对 J_c 的影响。在 YSZ/CeO₂/Ni 基片上制备出的 YBCO 超导薄膜为纯 c 轴织构, X-射线 φ 扫描半高宽为 15° 。超导转变温度 $T_c \geq 85\ \text{K}$, J_c 达到 $6 \times 10^5\ \text{A/cm}^2$ ($77\ \text{K}$, $0\ \text{T}$)。

3.2.2 新结构阻挡层研究^[13-15]

为更好地改善阻挡层表面状态及与金属基带的结合状况, 提出了新的阻挡层结构, 即在双轴织构衬底上用磁控溅射的方法生长立方织构的 MgO 阻挡层。研究了各种工艺参数如温度、气压、气氛、溅射功率、衬底表面处理等对 MgO 膜的影响, 包括对膜的表面和结构的影响。用扫描电子显微镜对 MgO/Ni 和 CeO₂/Ni 的表面形貌进行了分析比较, 结果表明, 在镍基底上生长的 MgO 膜较 CeO₂ 膜致密、连续, 完全没有 CeO₂ 在镍基底上的脱落现象, 并具有良好的重复性, 进一步的 X-射线 $\theta-2\theta$ 、 φ 扫描、极图测试表明, 在镍基底上的 MgO 膜获得了纯 c 轴取向和较好的平面内取向, 其 φ 扫描半高宽 $\leq 12^\circ$, 并显示了一定的立方织构, 确定了其在立方织构金属基底上用磁控溅射方法生长阻挡层的研究地位。

3.2.3 电子束蒸发研制 YSZ 阻挡层^[16-17]

电子束蒸发技术成膜速率快, 有利于提高隔离层厚度。采用电子束蒸发的方法生长了 YSZ 缓冲层, 不仅生长速率快, 而且单位时间生长面积大, 因此适合于产业化发展。在镍基带和铜镍基带上生长的 YSZ 隔离层具有立方织构, φ 扫描半高宽 $\leq 15^\circ$ 。

3.2.4 NiO 种子层研究^[18-21]

采用自氧化外延(SOE)方法, 在非真空加热炉中金属镍自氧化生长了 NiO 种子层。研究了生长工艺、基底织构和表面状态对 NiO 立方织构形成的影响。X 光衍射分析显示, NiO 具有高度立方织构, φ 扫描半高宽 $\leq 8.5^\circ$, 最好指标 6.6° 。用扫描电镜观测了 NiO 表面形貌。该方法适合于长带制备。以 NiO 为种子层, 并在其上制备 YSZ/CeO₂ 隔离层和 YBCO, 小样临界电流 $I_c =$

18 A/cm, J_c 达到 5×10^5 A/cm²。

早期的研究工作为以后长带的研究打下了基础。

3.3 YBCO 涂层导体长带的研究

3.3.1 真空方法制备隔离层^[22-29]

以研究制备高性能的 YBCO 涂层导体为目标, 结合实验室的研究基础和特色, 用自行研发的真空连续镀膜装置在金属基带上摸索出小样品 3 层 (Y_2O_3 , YSZ, CeO_2) 隔离层的生长工艺, 进一步研究了中长样 (几十厘米) 至长样 (米级) 3 层隔离层的生长工艺。在立方织构金属基带上, 研究了 CeO_2 /YSZ/ Y_2O_3 /隔离层的织构: c 轴取向、平面内取向、立方织构。通过以金属材料为靶材, 引入水气作为反应气体的手段, 解决了氧化物隔离层形成过程中, 衬底易被氧化的问题。实现了沉积连续、走带连续、加热连续、膜层连续、走带速率可控的动态生长技术, 隔离层表面的致密性、微裂纹、粗糙度、晶粒大小可以满足 YBCO 的生长。成功地获得了立方织构取向均匀的 CeO_2 /YSZ/ Y_2O_3 /NiW 结构隔离层长带。在 10 m 长的立方织构金属基带上用电子束蒸发和磁控溅射技术研制 3 层隔离层, 有效地抑制了金属衬底的氧化。X 射线衍射表明, Y_2O_3 φ 扫描半高宽为 7.77° , ω 扫描半高宽为 5.019° ; YSZ φ 扫描半高宽为 7.68° , ω 扫描半高宽为 4.675° 。帽子层 CeO_2 , φ 扫描半高宽小于 7° 。图 3 为 10 m 隔离层长带的照片。



图 3 10 米隔离层长带的实物照片

Fig. 3 Picture of 10 m long substrate with buffers

扫描电镜观察隔离层表面 (即 CeO_2 层), 在 1 万倍至 10 万倍下观察, 均无微裂纹。晶界平缓, 表面平整光亮, 原子力显微镜观测表面粗糙度 Ra , 在 $10 \mu m \times 10 \mu m$ 范围小于 10 nm。扫描俄歇探针实验结果表明各层有效地抑制了互扩散。在此基础上进一步改善工艺技术, 提高了隔离层的立方织构度, 在 1 m 长带上 CeO_2 /YSZ/ Y_2O_3 /NiW 3 层隔离层 φ 扫描半高宽均小于 7° , ω 扫描半高宽为 $4^\circ \sim 5^\circ$ 。

3.3.2 YBCO/ CeO_2 /YSZ/ Y_2O_3 /NiW 结构涂层导体性能的研究^[30-35]

在自行研制的 YBCO 涂层导体的动态实验装置上, 采用脉冲激光沉积技术, 在带有 CeO_2 /YSZ/ Y_2O_3 隔离层的 NiW 金属基带上连续制备了 YBCO 超导层。系统研究了 YBCO 超导层在带有隔离层的金属带上动态生长条件及影响因素, 各参数择优和控制, 动态生长过程中 YBCO 的成相: 元素成分、氧含量、缺陷等问题。解决了基带移动时的稳定控制问题, 解决了加热的稳定性问题; 研究了激光扫描模式、激光能量、激光脉冲频率、激光羽辉形态等对动态沉积 YBCO 超导层的影响, 实现了 YBCO 超导层长带连续均匀沉积技术, 取得了 $T_c = 89$ K, $I_c = 50$ A 的结果。在此基础上, 我们还对 YBCO 涂层导体的厚度效应, YBCO 超导层表面形貌, 与氧化物隔离层的界面反应、晶格匹配、应力效应等基础问题开展了深入研究。理论上, 在保持织构取向的前提下, YBCO 超导层越厚, 其载流能力越强。我们采取 2 种方式增加 YBCO 超导层的厚度。一是提高膜层生长速率, 一是增加膜层生长的有效时间。即在动态的生长过程中提高激光脉冲重复频率和减慢基带的移动速度。研究结果表明, 超导电流并未随 YBCO 膜厚的增加而增加, 达到一定厚度后, 电流值趋于饱和。我们对不同厚度的 YBCO 进行结构分析, 发现随厚度增加, 膜中 YBCO 的 a 轴取向增加。YBCO 超导层连续沉积过程中, 由于膜厚的增加, 导致 YBCO 表面生长温度的降低, a 轴取向也趋于增加, 使 YBCO 超导层整体性能降低。同时 YBCO 厚度增加, 表面形貌发生变化, 出现孔洞、裂纹, 凸起物, 且平面内取向变差, 严重影响超导性能。我们将 YBCO 的生长过程调整为多层生长机制, 以改进原来生长模式的弊端。进一步研究高性能的 YBCO 厚膜是今后研究的主要方向。

通过大量实验, 摸索出脉冲激光沉积连续制备 YBCO 超导层的成套工艺, 在动态条件下成功制备出米级长度的 YBCO 涂层导体, 平面内 φ 扫描半高宽小于 7° , ω 扫描半高宽为 3.68° 。在 1 mm 宽的刻蚀桥上, 四引线测电流 I_c 约为 25 A; 2 mm 宽的刻蚀桥上, 电流 I_c 近 50 A, 由此计算出 1 cm 宽样品的 I_c 值大于 200 A/cm; $T_c = 90.1$ K, $\Delta T = 0.5$ K; 磁测量 J_c 达 2.3 MA/cm²。 J_c (B) 为 0.5 MA/cm² (77 K, 1T) (在 IUMRS-ICA2010 会上报告)。图 4 为采用脉冲激光连续沉积制备的 1 m 长 YBCO 涂层导体带材照片。

3.4 实验设施的研发

3.4.1 真空镀膜装置

YBCO 涂层导体制备从基带到 YBCO 涂层需要多种



图 4 1 米长 YBCO 涂层导体带材实物照片

Fig. 4 Picture of real 1 m long YBCO coated conductor tapes

设备且大部分是非标设备。开发适合 YBCO 长带的研制设备是研究工作中很重要的一部分。目前国际上尚无成型的设备出售。我们研制的设备具有如下特点：高真空，高温加热，加热均匀，连续卷绕往复镀膜。该设备真空度可达 5×10^{-5} Pa；使用非接触式灯加热，加热温度可达 850 °C，正负温差 < 5 °C，温度均匀区 15 ~ 20 cm；基带移动速度 0 ~ 10 m/h 可调；多种镀膜方式合为一体，包括磁控溅射、电子束蒸发功能，一机多用。图 5 为真空连续镀膜装置，图 6 为加热器效果图，为该设备申请了相关专利。

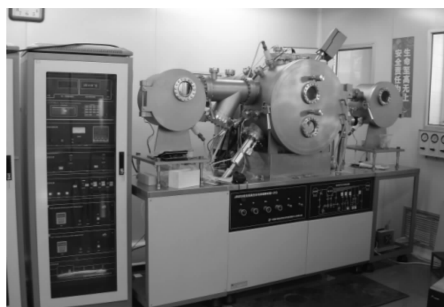


图 5 真空连续镀膜装置

Fig. 5 Continuous vacuum coating equipment

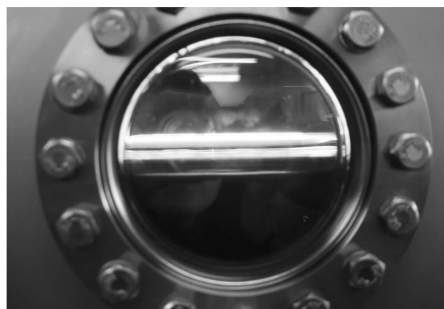


图 6 均匀加热区

Fig. 6 Heat treatment furnace with uniform heating zone

还自行设计、研发了脉冲激光连续镀膜设备(图 7)，该设备具备大面积均匀加热器、柔性金属基带卷绕机构、基带移动控制系统和靶材转动更换系统。旋转靶台同时可装 4 块靶材，可实现公、自转，转速 5 ~ 60 r/min 可调；该设备还配有磁控靶，可实现连续镀 Ag 保护层。通过与 KrF 准分子激光器(波长为 248 nm，频率可达 200 HZ)的配合(图 8 所示)，该设备可以实现脉冲激光动态沉积 YBCO 超导层，为深入、系统开展涂

层导体制备研究提供了实验条件。

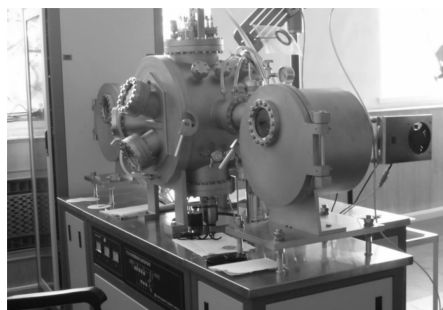


图 7 脉冲激光沉积连续镀膜设备

Fig. 7 Coating equipment with consecutive pulsed laser deposition



图 8 KrF 准分子激光器

Fig. 8 KrF excimer laser

3.4.2 建立超净实验室及相关设施

为适应长带研制的需求，建立了超净实验室及水电气的配套设施，建立了多气路系统。对有害气体进行了防护并建立了尾气处理装置。设计制作了长带的储带轮、筒、盘、多层盒。解决了样品的存放和保护问题。设计并建立了长带焊接的固定台，保证了长带的无损伤无污染焊接。设计制作了基带切割装置，可方便地对样品进行切割而不受损。制作了金属基带小样品用电性能测量的样品架等辅助设施。



图 9 洁净实验室

Fig. 9 Ultra-clean laboratory

4 授权专利

在涂层导体研究领域，有关基带、隔离层和超导层的制备技术及相关实验装置申请专利 20 余项，已获授

权专利 19 项, 其中发明专利, 如“无磁性立方织构铜镍基带及其制备方法”等 13 项, 实用新型专利, 如“一种用于金属薄带切割的装置”等 6 项。

5 结 语

多年来在科技部“863”和 973 项目的支持下, 开展了金属基带、氧化物隔离层和超导性能等多方面的研究工作。采用 RABiTS 技术路线, 研究了立方织构镍和铜镍合金长基带的制备工艺, 研究金属基带晶粒取向和均匀性, 提高织构度以及基带表面光洁度; 研究了隔离层的制备技术, 织构均匀性、连续性, 改善致密度, 消除微裂纹; 金属基带-隔离层-YBCO 超导层界面特性, 研究了高性能 YBCO 超导膜及隔离层的连续长带制备工艺。以轧制辅助双轴织构金属镍合金为基带, 在其上采用磁控溅射动态沉积技术, 成功获得了取向性和均匀性良好的米级长度的 $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{NiW}$ 隔离层, 其织构表现出良好的均匀性, φ 扫描半高宽为 $6^\circ \sim 7^\circ$ 。用 PLD 技术动态沉积研究了 YBCO 层的整套制备技术, 成功制备出米级长度 YBCO 涂层导体, 平面内 φ 扫描半高宽小于 8° , 超导转变温度 $T_c = 90.1 \text{ K}$, $\Delta T = 0.5 \text{ K}$, 临界电流 I_c 大于 200 A/cm-width 。临界电流密度 J_c 达 2.3 MA/cm^2 (77 K , 0 T)。

自主研发了多台连续的动态真空镀膜装置, 拥有成套实验装置, 包括磁控溅射、电子束蒸发、脉冲激光等。拥有 100 m^2 的洁净实验室, 并配有相关辅助设施。通过多年的研究工作, 全面了解了涂层导体所涉及的基础问题和关键技术, 明确了各个环节的重要影响因素及技术难点, 对解决问题的方案和采取的技术手段有了明确思路, 掌握了各部分的工艺技术, 申请并获得了相应的授权专利, 为今后的研究工作打下了坚实的基础。

参考文献 References

- [1] Shi Dongqi(石东奇), Yang Jian(杨 坚), Wang Chaoqun(王超群), et al. 制备立方织构 Ni 片研究 [J]. *Materials Science and Technology* (材料科学与工艺), 2000, 8(3): 12-15.
- [2] Shi K, Yang J, Yuan G S. *Proceedings of International Conference on Engineering and Technological Sciences 2000 Session 3 Advanced Materials* [C]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2000: 644-646.
- [3] Shi K(史 锴), Study on Cu-Ni and Ni Textured Tapes for the Second Generation of High T_c Superconducting Tapes(第二代高温超导带材立方织构 Cu-Ni 及 Ni 基带的研究) [D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2001.
- [4] Liu H Z, Shi K, Yang J, et al. Recrystallization Texture and Microstructure of Metal Substrate for Y123 Coated Superconductor [J]. *Journal of Rare Earths*, 2003, 21(4): 450-452.
- [5] Qu Fei(屈 飞), Yang Jian(杨 坚), Gu Hongwei(古宏伟), et al. 涂层导体用立方织构 Ni 基带的电化学抛光 [J]. *Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属), 2006, 30(4): 545-548.
- [6] Qu Fei(屈 飞), Yang Jian(杨 坚), Gu Hongwei(古宏伟), et al. 基带厚度对 YBCO 涂层导体织构 Ni 基带的影响 [J]. *Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属), 2005, 29(6): 814-818.
- [7] Qu Fei(屈 飞), Liu Huizhou(刘慧舟), Yang Jian(杨 坚), et al. 热轧对涂层导体用镍基带立方织构形成的影响 [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society* (中国稀土学报), 2005, 23(6): 766-769.
- [8] Yang Jian(杨 坚), Shi Dongqi(石东奇), Chang Shian(常世安), et al. 镍基带上制备 YBCO 高温超导薄膜研究 [J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics* (低温物理学报增刊), 1999, 21: 656-659.
- [9] Shi Dongqi(石东奇), Yang Jian(杨 坚), Chang Shian(常世安), et al. 在镍基片上制备 YSZ/ CeO_2 阻挡层和 YBCO 超导膜 [J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics* (低温物理学报), 1999, 21(1): 35-38.
- [10] Shi D Q, Yang J. Deposition of Biaxially Aligned YSZ Layers on Polycrystalline Metallic Substrate [J]. *Journal of Rare Earths*, 1998, 16: 223-226.
- [11] Shi Dongqi(石东奇), Yang Jian(杨 坚), Yuan G S(袁冠森), et al. 在多晶金属基片上制备双轴织构 YSZ 膜 [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society* (中国稀土学报), 1998, 16(3): 277-279.
- [12] Yang J, Shi D Q, Wang X H, et al. Epitaxial YSZ/ CeO_2 and YBCO on Cube Textured Nickel [J]. *Physica C*, 2000, 337: 67-70.
- [13] Yang Jian(杨 坚), Shi Dongqi(石东奇), Chang Shian(常世安), et al. 磁控溅射法在立方织构基底上制备 CeO_2 缓冲层 [J]. *Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属), 2000, 24(4): 292-295.
- [14] Yang J, Shi D Q, Wang X H, et al. Fabrication of YBCO Coated Conductors Using Magnetron Sputtering [J]. *Physica C*, 2000, 341-348: 2 499-2 500.
- [15] Yang J, Gu H W, Hu G Y, et al. Epitaxial CeO_2/MgO Buffer Layer on Cube Textured Ni Substrates for Superconducting Tapes [J]. *Physica C*, 2000, 341-348: 2 495-2 496.
- [16] Yuan G S, Yang J, Shi K. Epitaxial Buffer Layer on Ni and Cu-Ni Substrates for Y-Ba-Cu-O Film [J]. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2001, 11(1): 3 382-3 384.
- [17] Yang J, Gong S K, Liu H Z, et al. Texture and Surface Morphology of YSZ Buffer Layer on Ni-Based Tapes by Electron-beam-evaporation [J]. *Physica C*, 2003, 386: 337-341.
- [18] Yang J, Shi D Q, Park C, et al. Fabrication of Cube Textured NiO Seed Layer for YBCO Coated Conductor [J]. *Physica C*, 2004, 412-414: 844-847.
- [19] Yang Jian(杨 坚), Liu Huizhou(刘慧舟), Gu Hongwei(古

- 宏伟). 表面氧化外延制备钇系涂层导体隔离层 [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society* (中国稀土学报), 2004, 22(3): 421–423.
- [20] Yang J, Liu H Z, Gu H W, *et al.* Fabricating Buffer Layers for YBa₂Cu₃O_y Coated Conductor by Surface Oxidation Epitaxy [J]. *Journal of Rare Earths*, 2005, 23(4): 514–516.
- [21] Liu H Z, Yang J, Yang H T, *et al.* Fabrication of NiO Buffer Layer for YBCO Coated Conductors by Combining Sputtering and SOE Method [J]. *Journal of Rare Earths*, 2004, 22: 130–132.
- [22] Liu H Z, Yang J, Qu F, *et al.* Influence of Moving Tape Speed on Continuous Deposition of Buffer Layers for Long-Length YBCO Coated Conductors [J]. *Physica C*, 2007, 460–462: 1 415–1 417.
- [23] Yang J, Liu H Z, Qu F, *et al.* Continuous Deposition of Buffer Layers for YBCO Coated Conductor Using Reactive Magnetron Sputtering [J]. *Materials Science Forum*, 2007, 546–549: 1 871–1 876.
- [24] Zhang Hua(张 华), Liu Huizhou(刘慧舟), Yang Jian(杨 坚), *et al.* 反应溅射法连续制备 CeO₂ 隔离层 [J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*(低温物理学报), 2007, 29(3): 218–220.
- [25] Yang J, Liu H Z, Zhang H, *et al.* Surface Morphology and Microstructure of Direct Current Sputtering Growth of Buffer Layers for YBCO Coated Conductor [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2007, 21(18–19): 3 348–3 351.
- [26] Liu Huizhou(刘慧舟), Yang Jian(杨 坚), Zhang Hua(张 华), *et al.* 在移动 Ni-5W 基带上制备钇系涂层导体隔离层的研究 [J]. *Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属), 2008, 32(5): 627–630.
- [27] Zhang Hua(张 华), Jin Wei(金 薇), Yang Jian(杨 坚), *et al.* 反应气体 H₂O 对 Y₂O₃ 隔离层外延生长的影响 [J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*(低温物理学报), 2008, 30(4): 318–321.
- [28] Zhang Hua(张 华), Jin Wei(金 薇), Liu Huizhou(刘慧舟), *et al.* 走带速率对 Y₂O₃ 隔离层生长的影响 [J]. *Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属), 2009, 33(1): 35–38.
- [29] Zhang H, Yang J, Liu H Z, *et al.* Meter-Long CeO₂/YSZ/Y₂O₃ Buffer Layers for YBCO Coated Conductors Using DC Reactive Sputtering [J]. *Physica C*, 2010, 470: 1 998–2 001.
- [30] Zhang Hua(张 华), Yang Jian(杨 坚), Liu Huizhou(刘慧舟), *et al.* 射频溅射法在 CeO₂/YSZ/Y₂O₃/NiW 衬底上制备 YBCO 超导层 [J]. *Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属), 2007, 31(2): 245–247.
- [31] Yang J, Liu H Z, Zhang H, *et al.* Epitaxial Growth of Buffer Layers and YBCO for Coated Conductor [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2007, 21(18–19): 3 156–3 159.
- [32] Zhang Hua(张 华), Feng Xiaoliang(冯校亮), Wang Shuming(王书明), *et al.* 沉积温度对 YBCO 薄膜取向的影响 [J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*(低温物理学报), 2009, 31(3): 234–237.
- [33] Yang J, Zhang H, Feng X L, *et al.* Study on Deposition of YBCO for Coated Conductor Using Pulsed Laser Deposition [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 234: 022 043–022 047.
- [34] Yang J, Zhang H, Feng X L, *et al.* Continuous Deposition of YBCO Films for Coated Conductor Using PLD Method [J]. *Journal of Superconductivity and novel Magnetism*, 2010, 23: 977–979.
- [35] Zhang Hua(张 华), Yang Jian(杨 坚), Liu Huizhou(刘慧舟), *et al.* 脉冲激光法制备涂层导体 YBCO 超导层的研究 [J]. *Journal of Functional Materials*(功能材料), 2010, 41(3): 428–431.

新型弹性材料性能逼近天然骨骼

浙江大学化学系唐睿康课题组日前运用仿生学的方法制备了一种新型有机–无机复合弹性晶体材料,其物理和化学性能都逼近天然骨骼。晶体中无机单元的厚度几乎达到了生物材料中同类晶体的最小尺度,基本实现了在纳米尺度上类骨结构的仿生制备。相关成果发表在材料学顶尖刊物《先进材料》(Advanced Materials)上。

在外力冲击下,该仿生骨能够在保持晶体结构完整性的前提下发生一定程度的弯曲,而当外力消失,又像橡皮一样回复了原状,未见任何损伤。据测算,这种由 HAP 为主构建新材料的弹性远远高于传统 HAP,达到甚至超过了普通生物骨的弹性。“因此我们可以称它是一种弹性晶体。”唐睿康介绍,目前实验室还能通过改变仿生骨的成分调节晶体的形状和尺寸。

(来源:科技时报)



专栏特约编辑张平祥

张平祥：男，1965年生，东北大学金属材料专业工学博士，教授级高工，东北大学、西北工业大学等高校兼职教授、博士生导师；主要从事超导材料及其应用技术研究；2001年任西北有色金属研究院副院长，现任西北有色金属研究院党委书记、副院长，兼任中国材料研究学会理事、中国材料研究学会超导材料技术委员会常务副主任、西安市纳米技术学会副理事长、陕西省期刊学会副理事长；国家级新世纪百千万人才、陕西省科技新星、陕西省有突出贡献专家、陕西省“三五人才工程”人选、政府特殊津贴专家、第十四届陕西十大杰出青年和陕西省青年突击手标兵；先后荣获国家技术发明二等奖1项、省部级科技进步奖10项；获国家发明专利授权6项，在国内外重点学术期刊和会议上发表了百余篇学术论文。

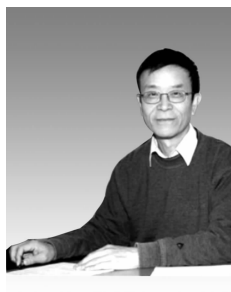
蔡传兵：男，1965年生，上海大学物理系教授、博士生导师；现任上海大学超导与应用技术研究中心主任，中



特约撰稿人蔡传兵

国材料研究学会超导分会常务委员；1990~1998年于中科院上海冶金所(现微系统所)学习和工作；主要从事氧化物超导材料研究，曾获上海市科技进步奖2项；1998年3月~2000年10月在日本大阪大学和铁道综合技术研究所从事博士后研究、为日本科技厅外国人特别研究员，之后在英国伯明翰大学和德国莱布尼茨固体与材料研究所从事第二代高温超导带材研究，2005年9月被上海大学聘为教授，上海市首届浦江学者；近年主持超导材料相关的国家“863”课题、国家自然科学基金项目、上海市重点科技攻关项目和中德科技合作PPP项目多项；在Appl Phys Lett和Phys Rev B等国家主流期刊上发表SCI收录论文70余篇。

韩征和：男，1948年生；清华大学物理系获学士学位，北京钢铁研究总院获硕士学位，丹麦哥本哈根大学奥斯特学院获博士学位；曾先后在瑞典皇家工学院、固体物理系、林雪平大学技术中心进行研究工



特约撰稿人韩征和

作；1993~1997在丹麦NKT研究中心任高级工程师，1993年进入丹麦NKT研究中心，后在丹麦NST公司任高级技术顾问，负责高温超导导线研究；2000年受聘为清华大学应用超导研究中心主任与教育部长江学者特聘教授、国家“十五”863计划新材料计划领域“超导材料与技术”专项总体专家组组长；主要从事高温超导线材生产、研究与应用开发工作；2001年4月底成功研制出503米铋系高温超导导线，综合性能指标达到世界先进水平，被评为2001年度中国十大科技新闻之一；多年来主持承担了多项国家“863计划”及北京市重点项目等多项国家级重大项目；其研究成果获国家科技进步二等奖，北京市科学技术奖一等奖，并获市、部委各种奖励7项；获北京市杰出人才贡献奖提名奖、北京市产学研先进个人奖和北京市留学人员创业奖。

李贻杰：男，1961年生，理学博士、教授、博士生导师；第二代高温超导带材领域知名专



特约撰稿人李贻杰

家，2011年1月成功研发出具有我国自主知识产权的第一根百米级第二代高温超导带材，填补了国内空白，并使我国在国际上跻身先进行列；此外，在重要国际学术刊物发表论文数十篇，多次在相关领域主要国际国内学术会议上主持会议或做大会特邀报告；主要研究方向为第二代高温超导带材、薄膜制备技术。

陶伯万：男，1972年生，工学博士、教授；长期从事多元氧化物超导薄膜、厚膜材料和器件应用研究；解决了3英寸双面YBCO薄膜的均匀性和一致性问题，实现了关键性能指标达到国际先进水平的YBCO薄膜材料的小批量制备；获得国家技术发明二等奖2项、国防科技进步一等奖、教育部技术发明一等奖、四川省科技进步三等奖、成都市科技进步二等奖；2008年获选新世纪优秀人才，2010年获得中国青年科技奖；在国内外刊物上发表/合作发表学术论文70余篇，授权发明专利4项；主要研究方向为高温超导薄膜



特约撰稿人陶佰万



特约撰稿人杨坚

及带材制备技术。

杨坚：女，1962年生，北京有色金属研究总院教授级高工；1991年至今一直从事高温超导材料的应用基础研究；自1997年以来，主要研究方向为第二代高温超导带材即涂层导体；研究工作包括立方织构金属基带的研究，隔离层的研究，YBCO涂层的研究和性能结构测试分析及基础实验装置的研发；多次担任国家863计划和973计划项目负责人；2003年应韩国Chan Park博士邀请作为访问科学家，到韩国电气技术研究院进行为期3个月的访问，参与了韩国涂层导体的研究工作；涂层导体的研究工作在国内外核心期刊和国际会议上发表论文70余篇，申请专利20余项，19项已获授权。