

中国材料大会 2024  
暨第二届世界材料大会  
**CMC 2024 & WMC 2024**

July 8-11, 2024  
Guangzhou, China

**D16-超导材料与应用**  
**D16-Superconducting Materials and Applications**

**Organized by**

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

## D16. 超导材料与应用

分会主席：张平祥、马衍伟

### D16-01

#### 低温超导线材批量化制备技术进展

郭强

西部超导材料科技股份有限公司

介绍西部超导材料科技股份有限公司在低温超导线材批量化制备技术进展。

### D16-02

#### 第二代高温超导带材发展动态和挑战

赵跃<sup>\*1</sup>、姜广宇<sup>2</sup>、武悦<sup>1</sup>

1. 上海交通大学

2. 甚磁科技（上海）有限公司

本文综述了第二代高温超导带材（2G-HTS）的研究进展、挑战与前沿技术。介绍了超导层制备技术制造技术，包括脉冲激光沉积（PLD）、金属有机化学气相沉积（MOCVD）等，并讨论了通过调整涡旋钉扎优化材料性能的方法。此外，报告还分析了第二代高温超导带材在工业规模生产的现状、面临的挑战和未来发展前景，以及为推动行业发展所需的材料研究与开发工作。最后报告介绍了依托上海交通大学科技成果转化成立的初创公司甚磁科技（上海）有限公司近期取得的进展。采用先进镀膜装备和工艺，生产的超导带材具有优异的载流性能。

### D16-03

#### 东部超导 2G-HTS 带材产业化及应用

王玉山\*

东部超导科技（苏州）有限公司

东部超导科技（苏州）有限公司是苏州新材料研究所的母公司，致力于基于 MOCVD 技术路线的 2G-HTS 带材的技术研究及其产业化。其自主设计的 MOCVD 设备实现了全国产业化，基于该技术路线研发的磁通钉扎技术，可实现超导材料在低温磁场下具有优异的  $I_c$  性能。随着各大研究领域的逐步拓展，带材需求的逐步增加，目前公司已具备 2000km 的 2G-HTS 带材批量化制备产能。

### D16-04

#### MOD 法二代高温超导带材厚膜及人工钉扎协同效应研究

周迪帆<sup>1,2</sup>，黄荣铁<sup>1,2</sup>，陈静<sup>1,2</sup>，杨丽莹<sup>1</sup>，刘志勇<sup>\*1,2</sup>，蔡传兵<sup>\*1,2</sup>

1. 上海大学上海市高温超导重点实验室

2. 上海上创超导科技有限公司

二代高温超导带材是大电流输电电缆、高场磁体等重要应用的关键材料。金属有机溶液涂层（MOD）法是批量化制备二代高温超导长带的重要方法，具有成本低，适合批量化生产等重要特点。本研究从增加薄膜厚度，提高薄膜载流截面和添加人工钉扎中心，提高磁通钉扎性能两个方面，实现了 MOD 制备高温超导带材的载流性能提升。研究发现，保持和提高薄膜的生长动力是实现高密度异质相均匀掺杂的关键因素，通过厚膜生长和纳米颗粒添加的协同效应，高温超导带材的在场性能可以得到大幅的提升。

## D16-05

**FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub> 涂层导体中的厚度效应研究**

徐中堂\*、马衍伟

中国科学院电工研究所

铁基超导体因具有相对较高的临界转变温度  $T_c$ 、极高的上临界场  $B_{c2}$  和较小的各向异性  $\gamma$ ，在弱电和强电领域具有显著的应用优势。因此，铁基超导薄膜对于基础研究和应用研究均具有重要的意义。目前，涂层导体技术是最可能实现 11 体系铁基超导体强电应用的方法。但当前的 11 体系涂层导体研究中，涂层的厚度仅为数百纳米，难以提高工程电流，无法满足实际需求。为了推进 11 体系涂层导体的强电应用，我们首次在 IBAD-LMO 金属基带上制备出了  $2\text{ }\mu\text{m}$  厚超导层的涂层导体。我们采用界面工程方法克服了难以直接生长微米级别厚膜的困难，并首次得出了 11 体系超导体中厚度效应的表现形式。研究发现，厚度增加造成钉扎机制由  $\delta I$  类型转变成为  $\delta T_c$  类型，并提出通过钉扎工程增强  $\delta I$  钉扎并降低  $\delta T_c$  钉扎有望进一步消除或减弱厚度效应。

## D16-06

**MgB<sub>2</sub> 超导材料的制备及应用研究**

杨芳\*

西北工业大学

采用 in-situ PIT 工艺，制备了千米级长度的 19 和 37 芯 MgB<sub>2</sub> 长线，线材  $J_c$  为  $2.31 \times 10^5\text{ A/cm}^2$  (4.2 K, 4 T)，与国际上 MgB<sub>2</sub> 线材生产公司性能相当；采用 IMD 工艺，制备出百米级 7、19 和 37 芯 MgB<sub>2</sub> 线材，37 芯线材在 4.2K、4T 下的工程临界电流密度达到  $7.2 \times 10^4\text{ A/cm}^2$ ，比国际上 Hyper.Tech 报道的  $7.0 \times 10^4\text{ A/cm}^2$  二代线材性能还要高一些；基于储能项目应用需求，进行了 MgB<sub>2</sub> 超导电缆的设计、加工、热处理及性能测试，4.2K，4T 和 20K，2T 的超导传输性能分别达到 6.56kA 和 7.04 kA。

## D16-07

**实用化 MgB<sub>2</sub> 超导线材制备及其性能研究**

王庆阳\*、冯建情、陈震宇、闫果、李建峰、张平祥

西北有色金属研究院

MgB<sub>2</sub> 超导材料具有相干长度较大、无晶界弱连接、原材料成本低廉、加工成型工艺相对简单等诸多优点，受到国内外物理学家和材料科学家们的关注。高性能多芯长线带材是 MgB<sub>2</sub> 超导材料应用的基础，国际上已经形成了以美国 Hyper Tech 公司、意大利 ASG 公司等为代表的实用化长线生产厂家，并且开展了相关应用研究，国内在实用化 MgB<sub>2</sub> 超导材料特别是应用领域研究较少。基于当前现状，本课题组开展了千米级实用化 MgB<sub>2</sub> 超导线带材的制备技术研究，采用强度较高的梦乃尔合金 (Monel 400) 作为外包套材料，以原位法粉末装管工艺 (in situ PIT)，通过拉拔、轧制和中间退火热处理相结合的加工手段制备出千米级 19-37 芯结构线材。微观结构、力学性能和超导电性等分析手段表明，线材中 MgB<sub>2</sub> 芯丝分布较为规整，Nb 阻隔层表面较为光滑，未出现明显破损现象， $\Phi 1.0\text{ mm}$  的多芯线材中 MgB<sub>2</sub> 超导芯丝的平均直径达到  $100\text{ }\mu\text{m}$  以下，热处理后线材的屈服强度均大于 200 MPa。MgB<sub>2</sub> 线材的临界电流密度在 4.2 K、4 T 时达到  $2000\text{ A/mm}^2$ ，并采用该线材进行了超导电缆及螺线管型磁体的研究。

**D16-08****铁基超导线材研究进展**

张现平

中国科学院电工研究所

铁基超导体具有极高的上临界磁场、较小的各向异性、简单的制备工艺等突出优点，在磁控核聚变装置、核磁共振谱仪、加速器磁体等高场领域具有重要的应用前景。目前铁基超导材料正处于快速发展的研发阶段，超导线材临界传输电流密度在 4.2 K 和 10 T 下超过 150000 A/cm<sup>2</sup>，显示了良好的高场传输特性；百米量级铁基超导长线临界电流密度在 4.2 K 和 10 T 下超过 60000 A/cm<sup>2</sup>，奠定了铁基超导材料在强电领域的应用基础。本文系统介绍了铁基超导线材的制备及性能提高过程，从影响铁基线材临界电流密度的关键因素：相纯度、晶界弱连接以及致密度等方面入手，详细分析了国内外铁基超导线带材的最新研究进展，并提出进一步改善传输性能的工艺途径。

**D16-09****实用化高温超导材料研究进展**

张胜楠，刘吉星，郝清滨，王庆阳，李建峰，张平祥

西北有色金属研究院

尽管 1911 年超导现象发现至今已经陆续报道了上千种具有超导转变的材料，但是能够实现实际应用的材料只有不到十种。其中，基于强电和强磁场应用的材料往往需要经过复杂的技术加工成具有一定长度的线带材。西北有色金属研究院超导材料研究所长期致力于粉末装管法 Bi-2223、Bi-2212 以及 MgB<sub>2</sub> 等材料的制备技术开发，近年来通过开发包括喷雾热分解前驱体粉末制备技术、低温拉拔技术、超声拉拔技术等一系列新型材料制备技术，结合加工工艺参数的系统性优化，已经实现了相关材料载流性能的有效提高和长线带材的稳定化制备。本报告将对相关高温超导材料体系的性能特点、应用领域以及西北有色金属研究院的最新研究进展进行系统性介绍。

**D16-10****Bi2212 高温超导线材进展**

郝清滨\*、李成山、徐晓燕、焦高峰、金丽华、姚凯、李珍宝、张胜楠

西北有色金属研究院

Bi2212 超导线材是强磁场应用领域重要的候选材料。其优点包括：100T 以上的上临界场、20T 以上垂直强磁场下  $J_c$  最大的超导材料、圆线结构、低成本工业化、磁滞损耗接近 ITER Nb<sub>3</sub>Sn 股线、RRR 达到 ITER 标准等。本文对我院近两年在 Bi2212 线材制备技术、线材的低成本化、Bi2212 线圈、Bi2212 电缆的工作进行介绍。1) 突破了高均匀、高载流千芯千米 Bi2212 高温超导长线的制备技术，达到了 ITER 项目对超导线材长度的要求；2) 掌握了高质量 Bi2212 前驱粉末的制备；3) 通过结构优化制备出无渗漏的 Bi2212 长线，将单线螺线管线圈的载流性能提升 3 倍以上， $J_c$  超过 500A/mm<sup>2</sup> (4.2K, 12T)；4) 解决了绞缆过程中线材性能大幅下降的问题，将电缆中 Bi2212 线材性能保持率从 50% 提高到 90% 以上，逐步推动 Bi2212 在聚变中的应用。5) 推动低成本 Bi 系超导长线制备。经过多年的发展，我院已基本掌握 Bi2212 线材的批量制备技术，基本满足 NMR、聚变和加速器线圈的要求。

**D16-11****铜氧化物高温超导薄膜的微细图形化及应用**

马欢、李力敏、楼欣妍、巨剑、雷黎\*、赵高扬

西安理工大学

超导薄膜的图形化是超导电子器件应用的前提。目前低温超导薄膜可通过传统半导体光刻技术实现高质量图形化应用；而对于超导性能易退化的铜氧化物高温超导薄膜来说，无论是化学湿法刻蚀还是离子束干法刻蚀均会对薄膜的超导性能产生不利影响。因此，开发出一种超导性能无损的高温超导薄膜图形化的制备方法至关重要。本文将开发的感光溶胶-凝胶光刻法成功应用到了铜氧化物高温超导薄膜（如 REBCO、BSCCO 等）的图形化制备中。该方法的核心是合成具有紫外感光特性的 REBCO 或 BSCCO 的前驱体溶胶，然后通过特定掩模板将 REBCO 或 BSCCO 凝胶膜图形化，再经过适当热处理即可得到超导性能无损的高质量 REBCO 或 BSCCO 薄膜图形。采用该方法已分别在  $\text{LaAlO}_3$  单晶衬底和  $\text{RABiTS-NiW}$  基带上制备出了 REBCO 或 BSCCO 超导膜微图形，为高温超导电力、电子学应用提供了一种新方法和新途径。

**D16-12****Bi2212 多芯圆线的性能提升机制**

金利华\*

西北有色金属研究院

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) 是目前唯一可制备成各向同性圆线的高温超导材料，具有优异的磁场载流特性。影响 Bi2212 线材的临界电流密度的主要因素包括多芯结构、芯丝织构、前驱粉末、热处理工艺等。本文采用粉末装管法制备了 Bi2212 线材，研究了 Bi2212 线材的熔化再结晶生长行为，分析了不同因素对 Bi2212 线材的载流性能的影响规律。研究表明，Bi2212 芯丝中第二相是提升线材临界电流密度的关键。通过优化制备工艺参数，极大提升了 Bi2212 线材的载流性能。与本实验室前期线材相比，Bi2212 线材的临界电流密度提升约 2 倍，在 4.2K、12T 下  $J_c$  达到  $6180 \text{ A/mm}^2$ ，将进一步促进 Bi2212 线材的应用发展。

**D16-13****铁基超导线材的四辊轧制工艺与性能研究**

姚超、郭文文、熊颢、马衍伟\*

中国科学院电工研究所

铁基超导体由于其极高的上临界场和非常小的各向异性，而且能够采用成本较低的粉末装管法制备成超导带材，在高场核磁共振成像、核磁共振谱仪，高能粒子加速器、可控核聚变装置等高场强电领域有较强的应用潜力。目前，采用平辊轧制制备的铁基超导带材的传输临界电流密度已在 4.2K，10T 下突破  $10^5 \text{ A/cm}^2$  的实用化门槛，并已实现高性能百米量级长线的制备。与超导带材相比，具有更小的各向异性的线材在实际应用中更易于绞缆和磁体建造，因此成为实用化线材研究的一个重要方向。目前，高性能的铁基超导线材主要采用孔型轧制和旋锻等工艺进行加工，存在金属包套加工硬化较大、超导芯均匀性较差等问题。本研究基于四辊轧制工艺制备了铜银复合包套 Ba-122 铁基超导线材，通过对线材结合和加工工艺的优化，使线材的超导芯占比和超导芯的均匀性得到了显著提高。通过对线材金属包套的硬度分布及超导芯微观结构的表征发现，四辊轧制能够有效降低金属包套的加工硬化，减少加工过程中超导晶粒的破碎，从而实现薄壁包套线材的制备，并改善超导晶粒的织构取向。在采用四辊轧制工艺制备单芯线材的基础上，进一步采用该工艺制备了十米量级的多芯线材，制备出的线材具有良好的均匀性和载流性能，为下一步制备实用化多芯长线奠定了基础。

## D16-14

复合包套  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  和 IMD 法  $\text{MgB}_2$  超导线带材制备技术的研究

林鹤\*

福建师范大学

采用 Ag 作为内阻隔层、高机械强度金属作为外加强包套成为铁基超导线带材的研发新热点。本课题组选取高延展性高强度的 Ti/Ag 包套结构,提出“覆铜拉拔与去铜轧制”技术策略来实现多芯复合体的整体协同变形,制备出单芯和 7 芯 Ti/Ag 包套  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  超导线带材。4.2 K 和 10 T 时单芯和 7 芯带材的  $J_c$  值分别达到  $4.5 \times 10^4$  和  $3.1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ; 并且带材具有超导填充因子大和机械强度高的优点。

此外,我们制备了高均匀性的 19 芯和 37 芯 IMD 法  $\text{MgB}_2$  多芯线材,热处理后中心 Mg 棒向 B 层扩散反应后生成了致密度高、厚度均匀的  $\text{MgB}_2$  层。在 4.2 K 和 4 T 下,IMD 法 37 芯  $\text{MgB}_2$  超导线材的工程  $J_e$  达到了  $2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 。通过优化塑性加工工艺和热处理制度,进一步制备出线径 1 mm 和 (18+1) 芯 IMD 法  $\text{MgB}_2$  线材,该线材横纵向截面分布均匀,磁化转变  $T_c$  约为 37.5 K。

## D16-15

初始粉末粒径对  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导体的合成、微观结构和超导性能的影响高瞻<sup>1</sup>、张泽荣<sup>3</sup>、王秋良<sup>\*2</sup>

1. 中国科学技术大学

2. 中国科学院电工研究所

3. 中国科学院赣江创新研究院

粉末冶金工艺是合成超导相和制备超导线材的常用方法之一,其中粉末的初始粒径对超导特性有重要影响。然而,有关粉末粒径对制备  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导的影响却鲜有报道。因此,本研究以  $\text{Nb}:\text{Sn}:\text{Cu} = 3:1:5$  (at.%) 的成分体系为基础,采用粉末冶金法系统研究了 Nb、Sn 和 Cu 粉末粒度对  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导体的合成、微观结构和超导性能的影响。结果表明,Nb 粉的粒径对  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导相的合成影响很大,而 Cu 和 Sn 粉末的粒径对其影响微乎其微。此外,块状样品的微观结构和晶粒形态也会受到 Nb 粉粒径的影响。具体来说,减小 Nb 粉的粒径可以提高反应效率,促进形成具有网络结构的  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  层。然而,进一步减小 Nb 的粉末尺寸会导致 Sn 的缺乏和柱状晶粒的生长。此外, Nb 粉粒径约为  $3 \mu\text{m}$  的块状样品表现出最高的临界电流密度 ( $J_c$ ),在 12 T 时达到  $1220 \text{ A/mm}^2$ ,这可能归因于其等轴晶粒形态、较小的平均晶粒尺寸 (65 nm) 以及来自  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  层纳米孔的磁通钉中心。

## D16-16

## Experimental investigations on the nickelate high-Tc superconductors

Meng Wang

School of Physics, Sun Yat-Sen University

Since the discovery of superconductivity at 80 K in single crystals of  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  at pressures above 14.0 GPa, extensive efforts have been made to understand the properties of the bilayer nickelate system at both ambient and high pressures. CDW, SDW, structural transition, strange metal behavior, orbital dependent correlations, etc. which are profound in copper oxide and iron-based superconductors also present in the pressure-dependent phase diagram of  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ . They may be related or irrelevant to the superconductivity of nickelates under pressure. Currently, many questions are open. In this talk, I will briefly introduce the discovery of the superconductivity in  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  and discuss the research progress in nickelate superconductors.

## D16-17

## 实用化铁基超导线带材临界电流与磁通钉扎研究

董持衡<sup>1</sup>、杨欢<sup>2</sup>、闻海虎<sup>2</sup>、马衍伟<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院电工研究所, 北京, 100190<sup>2</sup>南京大学物理学院, 南京 210093

铁基超导体具有优异高场载流性能及低成本等独特优势, 有望在强磁场领域获得规模化应用。目前, 国际上一般采用粉末装管法制备实用化铁基超导线带材。其临界电流密度由超导晶粒内的载流性能及晶粒间的电流传输效率共同决定。我们首先以铁基超导单晶作为研究对象, 采用后退火工艺调控单晶内部非超导的反铁磁/正交相, 从而形成强钉扎结构, 大幅提高单晶临界电流密度至 1 MA/cm<sup>2</sup>。该研究表明常规工艺制备的铁基超导单晶磁通钉扎能力较弱, 需要后续处理引入强钉扎结构以提高钉扎效率  $\eta = J_c/J_d$  (拆对临界电流密度  $J_d \sim 100$  MA/cm<sup>2</sup>)。其次, 我们通过载流子掺杂对铁基超导带材晶间传输效率进行调控。发现晶粒内临界电流密度  $J_c^{\text{intra}}$  在欠掺杂区域达到最高值, 而晶间临界电流密度  $J_c^{\text{inter}}$  在过掺杂区域达到最高值, 且晶界传输效率  $\varepsilon = J_c^{\text{inter}}/J_c^{\text{intra}}$  随着载流子浓度增加而增大。TEM 测试表明大部分晶界被 FeAs 湿润相所污染。最后, 我们建立了基于近邻效应的 SNS 约瑟夫森结电流传输模型, 能够较好地解释铁基超导带材的掺杂效应。根据以上研究结果, 我们认为应首先解决超导晶粒间耦合问题, 并在此基础上提高晶粒内及晶界的磁通钉扎能力, 从而大幅提高铁基超导线带材临界电流密度。

## D16-18

## U 粒子照射对 Kagome 超导体 CsV3Sb5 和 Cs(V0.93Nb0.07)3Sb5 超导性能的影响

王春雷<sup>\*1</sup>、王路斌<sup>1</sup>、王秩伟<sup>2</sup>、Tsuyoshi Tamegai<sup>3</sup>

1. 信阳师范大学

2. 北京理工大学

3. 东京大学

利用电阻率和磁化强度测量, 研究了 2.6 GeV U 辐照对 CsV3Sb5 和 Cs(V0.93Nb0.07)3Sb5 单晶超导电性的影响。CsV3Sb5 晶体经 U 辐照后, 在照射剂量为 2.0Td 的情况下, 其临界转变温度提高到 4.3K; 在 T = 2.0 K 和照射剂量为 0.5T 的情况下, 临界电流密度增加到 ~8000 A/cm<sup>2</sup>, 这大约是相同条件下原始样品的 4 倍。对于 Cs(V0.93Nb0.07)3Sb5 晶体, 在照射剂量低于 2.0T 的情况下, 临界转变温度几乎保持不变, 随后随着剂量的进一步增加超导电性逐渐被抑制。除了增强的临界电流密度外, 在 Cs(V0.93Nb0.07)3Sb5 晶体中, 在低辐照剂量下接近零场的磁滞回线中观察到异常峰值效应, 可以用匹配效应进行解释。

## D16-19

## Ectopic-Pressure effects on vortex dynamics of TiZrHfNb medium-entropy alloy

Lina Sang\*

Tianjin University of Technology

Medium and High-entropy alloys ((MEAs-HEAs) superconductors—a new class of functional materials—can be utilized stably under extreme conditions, such as in space environments, owing to their high mechanical hardness and excellent irradiation tolerance. We performed a systematic study of the pressure effect on the superconducting transition temperature ( $T_c$ ), critical current density ( $J_c$ ), irreversibility field ( $H_{irr}$ ), upper critical field ( $H_{c2}$ ), the magnetic relaxation and flux pinning mechanism in TiZrHfNb medium-entropy alloy. We found that  $T_c$  and  $J_c$  is significantly enhanced under ectopic-pressure, and the  $H_{irr}$  line is shifted to higher fields. The vortex creep rate is strongly suppressed and the pinning energy is very significantly increased by pressure.

## D16-20

**Study of vortex glass-liquid transition and superconducting properties of single-crystalline boron-doped FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub>**Jie Zhang<sup>1</sup>, Jens Hänisch<sup>2</sup>, X.S. Yang<sup>\*3</sup>, Yu Feng<sup>4</sup>, Yong Zhao<sup>5,6</sup>

1. Chengdu University of Technology, Chengdu

2. Institute for Technical Physics, Karlsruhe Institute of Technology, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, Eggenstein-Leopoldshafen, 76344, Germany

3. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Extreme Conditions, Dongguan, 523803, China

5. College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

6. Fujian Provincial Collaborative Innovation Center for Advanced High-Field Superconducting Materials and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

We report on the superconducting transport properties of B-doped FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub> single crystals grown by the self-flux method. The structure and superconductivity of these samples were carefully analyzed using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and electrical transport measurements. The crystal structure owns the same tetragonal symmetry as PbO. The B-doped samples show a more significant electronic anisotropy in the superconducting state. Microstructural analysis shows that B-doping of FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub> increases the Fe content in the single crystal samples. B-doping decreases T<sub>c</sub> slightly, resulting in lower irreversibility lines. This work revealed the physical effects of B-doping in FeSe<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub> superconductors and inspired a way to regulate the superconductivity through elemental manipulation.

## D16-21

**铁基材料中磁通行为与超导特性的关联研究**

刘宁宁\*

中国科学院电工研究所

当我们深入探究铁基材料时，一个引人入胜的研究方向便是其内部磁通动态与超导特性之间的潜在联系。在铁基材料中，磁通行为扮演者举足轻重的角色。这种行为涉及到了材料内部的磁场分布、磁矩排列及其与外部磁场的交互作用。那么，这两者之间是否存在微妙的联系？这正是我们研究的核心所在。通过对实验数据进行严谨分析，我们试图揭示铁基材料中磁通行为与超导特性之间的潜在关联性。为此，我们研究了表面吸附 K 原子的多层 FeSe 薄膜 (K/FeSe) 和 Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> (B122) 多晶带材两个体系。

(1) BKT 相变是二维超导薄膜中常见的拓扑相变，其行为和特性主要受系统的无序度和涡旋自能的影响。我们聚焦于 K/FeSe 薄膜体系，探究了无序度和涡旋自能对其 BKT 相变和超导电性的影响。利用针对样品尺寸的理论模型，我们对不同 K 原子覆盖量下的双线圈互感技术测量结果进行了超流密度 (superfluid density) 的计算，并对其利用重整化群理论进行了 BKT 拟合。拟合结果再现了超流密度随温度的变化过程，这是首次为 K/FeSe 薄膜中 BKT 相变的存在提供了有利的证据。从中我们获得了有关薄膜无序度和涡旋自能的信息。研究表明，涡旋自能在 BKT 相变过程中扮演者关键作用，且其行为由相位刚度主导。相位刚度还对 T<sub>c</sub> 的变化起着主导作用，而无序度对此的影响相比之下可以忽略。此外，通过分析涡旋自能与超导基本能标 (如超导能隙) 之间的关系，我们发现了二维量子临界点存在的迹象。这些研究强调了由涡旋引入的相位涨落在揭示 K/FeSe 薄膜体系的 BKT 相变和超导电性方面发挥着重要作用。

(2) 探究超导体中的磁滞行为对于充分利用其在各种应用中的潜力至关重要。然而，磁滞回线 (MHLs) 的研究存在一定的复杂性，这主要源于晶粒内和晶粒间磁矩的叠加具有不同种结果，这使得建立有效的理论模型变得困难。在这里，我们研究了强织构的 Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> (Ba122) 带材的 MHLs，其中晶粒间磁矩显著大于晶粒内磁矩。MHLs 显示出独特的行为，即磁矩的峰值和谷值分别出现在减小和逆向增加的磁场过程中，这一现象不能用现有模型描述。我们提出了一个扩展模型，将 Muller 等人提出的临界态模型中的涡旋困捕迈斯纳态 (vortex-trapped state) 纳入，以提供对其 MHLs 特征的更全面解释。我们的研究提供了晶粒间磁矩占主导地位的罕见实例，并为具有良好排列晶粒的多晶超导体的 MHLs 提供了新的研究视角。

**D16-22**

Large asymmetric anomalous Nernst effect in the antiferromagnet  $\text{SrIr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{O}_3$

Dongliang Gong

Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences,

A large anomalous Nernst effect is essential for thermoelectric energy-harvesting in the transverse geometry without external magnetic field. It's often connected with anomalous Hall effect, especially when electronic Berry curvature is believed to be the driving force. This approach implicitly assumes the same symmetry for the Nernst and Hall coefficients, which is however not necessarily true. Here we report a large anomalous Nernst effect in antiferromagnetic  $\text{SrIr}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{O}_3$  that defies the antisymmetric constraint on the anomalous Hall effect imposed by the Onsager reciprocal relation. The observed spontaneous Nernst thermopower quickly reaches the sub-  $\mu\text{V/K}$  level below the Néel transition around 250 K, which is comparable with many topological antiferromagnetic semimetals and far excels other magnetic oxides. Our analysis indicates that the coexistence of significant symmetric and antisymmetric contributions plays a key role, pointing to the importance of extracting both contributions and a new pathway to enhanced anomalous Nernst effect for transverse thermoelectrics.

**D16-23**

**Disorder-broadened phase boundary with enhanced amorphous superconductivity in pressurized  $\text{In}_2\text{Te}_5$**

Yi Zhao<sup>1</sup>, Tianping Ying<sup>2</sup>, Lingxiao Zhao<sup>1</sup>, Juefei Wu<sup>1</sup>, Chuizhen Chen<sup>3</sup>, Yanpeng Qi<sup>\*1</sup>

1. ShanghaiTech University
2. 中国科学院物理研究所
3. 苏州大学

As an empirical tool in materials science and engineering, the iconic phase diagram owes its robustness and practicality to the topological characteristics rooted in the celebrated Gibbs phase law ( $F = C - P + 2$ ). When crossing the phase diagram boundary, the structure transition occurs abruptly, bringing about an instantaneous change in physical properties and limited controllability on the boundaries ( $F = 1$ ). Here, we expand the sharp phase boundary to an amorphous transition region ( $F = 2$ ) by partially disrupting the long-range translational symmetry, leading to a sequential crystalline-amorphous-crystalline (CAC) transition in a pressurized  $\text{In}_2\text{Te}_5$  single crystal. Through detailed in-situ synchrotron diffraction, we elucidate that the phase transition stems from the rotation of immobile blocks  $[\text{In}_2\text{Te}_2]^{2+}$ , linked by hinge-like  $[\text{Te}_3]^{2-}$  trimers. Remarkably, within the amorphous region, the amorphous phase demonstrates a notable 25% increase of the superconducting transition temperature ( $T_c$ ), while the carrier concentration remains relatively constant. Furthermore, we propose a theoretical framework revealing that the unconventional boost in amorphous superconductivity might be attributed to an intensified electron correlation, triggered by a disorder-augmented multifractal behavior. These findings underscore the potential of disorder and prompt further exploration of unforeseen phenomena on the phase boundaries.

## D16-24

## 延展性良好的常压少氢金属键氢化物高温超导新材料

田冲、贺勇、刘仕明、朱耀辉、史俊杰\*

北京大学

超导是公认的物理学跨世纪难题，也是物理学皇冠上的明珠。自 Ashcroft 在 2004 年预言金属多氢化物是可能的高温超导材料以来，一些高压多氢化物高温超导材料相继被发现，其中  $\text{LaH}_{10}$  在 170-200 GPa 下具有目前最高超导转变温度  $T_c=250-260\text{ K}$ 。然而，如此高的高压条件完全限制了材料的实际应用，它们的 H-H 共价键直接导致其延展性极差。除了高压多氢化物，铜基、铁基以及镍基超导体也主要由共价或离子键结合，延展性极差。迄今为止，具备良好延展性和  $T_c$  高于液氮温度（77 K）的超导材料依然缺失。

为了找到在常压下具有良好延展性的高温超导新材料，我们使用 VASP, QE 和 EPW 等计算软件，基于 Eliashberg 理论，预测了一系列延展性良好的常压少氢金属键氢化物高温超导新材料。主要创新成果如下：（1）与传统的高压多氢共价或离子氢化物高温超导材料设计思路完全相反，开辟了常压少氢金属键氢化物高温超导材料设计全新思路；（2）首次发现并命名少氢金属键钙钛矿高温超导材料  $\text{Al}_4\text{H}$  ( $T_c=54\text{ K}$ ) [1],  $\text{Pb}_4\text{H}$  ( $T_c=46\text{ K}$ ) 和  $\text{MgHCu}_3$  ( $T_c=42\text{ K}$ ) [2]; （3）金属键钙钛矿  $\text{ZnHAl}_3$  ( $T_c=80\text{ K}$ ) [3]和金属键纳米超晶格 $(\text{Be}_4)_2\text{H}$  ( $T_c=78\text{ K}$ ) [4]填补了液氮温区延展性良好的高温超导材料缺失的空白；（4）基于晶体结合的物理本质--原子的成键方式，对超导材料进行了分类，首次提出了赝金属超导体和准金属超导体的新概念。综上，我们证明了常压少氢金属键氢化物是很有潜力的具有良好延展性的高温超导新材料，为设计新型实用高温超导材料开辟了一条新的道路。

## D16-25

## Pressure-induced superconductivity with Pauli limit violating upper critical field in Ta-Te granular nanowires

Lingxiao Zhao, Yi Zhao, Yanpeng Qi\*

ShanghaiTech University

Nanoscale superconductors present exotic properties compared with their bulk isomers. In the cases of few-layer 2D superconductors and some kinds of superconducting nanowires, the upper critical field ( $\mu H_{c2}(0)$ ) is much higher than the corresponding bulk materials. In this work, we have synthesized the Ta-Te granular nanowires. Superconductivity is induced via high-pressure modulations in these nanowires. The superconducting temperature  $T_c$  and  $\mu H_{c2}(0)$  is about 4 K and 16 T under high pressure, two times beyond the Pauli limit. The combinations of transition metal chalcogenides' elemental compositions, nanowires and high-pressure modulations have succeeded in realizing a large  $\mu H_{c2}(0)$  in the Ta-Te nanowires. Our work demonstrates that the Ta-Te nanowire is a possible candidate for applications in high magnetic fields, and it also provides an ideal platform for further investigations of the mechanisms between nanowires and large  $\mu H_{c2}(0)$ .

## D16-26

**The Role of Pressure and Coulomb Interactions in the Phase Behavior of Perovskite Nickelates**

Songyuan Geng, Haoxiang Li\*

Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou)

The recent discovery of superconductivity in perovskite-phase nickelates has sparked widespread interest in these strongly correlated materials. Superconductivity only emerges under high pressure, which triggers a structural transition toward higher lattice symmetry. Understanding the electronic structure changes caused by this transition is crucial for comprehending this novel class of superconductors. Using angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) and first-principle calculations, we investigated the electronic structures of the three-layer Ruddlesden-Popper phase perovskite nickelates,  $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$  and  $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ . Our results reveal a universal flat band structure of  $d_{z^2}$  orbital character, pinned near the Fermi level, even under drastic structural transitions driven by external pressure (P) and Coulomb interaction (U). In contrast, the  $d_{x^2-y^2}$  band undergoes a gradual shift in band mass, following changes in P and U. Contrary to many density functional theory (DFT) calculations, our findings suggest that lower-pressure phases benefit from a smaller Coulomb U ( $\approx 1-1.5$  eV), while higher crystal symmetries require a higher U ( $\approx 4$  eV). The potential Fermi instability driven by the  $d_{z^2}$  flat band and the  $d_{x^2-y^2}$  van Hove structure indicates an intriguing interplay between the electronic structure and lattice, potentially playing a crucial role in superconductivity emergence.

## D16-27

**Ba122 铁基超导体凝固过程中 Fe-As 相的产生和调控机制**

汤明辉、董持衡、徐中堂、姚超、王栋樑、张现平、马衍伟\*

中国科学院电工研究所

实用化 Ba122 铁基超导体多晶的传输性能仍受制于晶界弱连接效应，能否通过工艺设计实现熔融织构和单畴块体生长以大幅提升临界电流密度？鉴于 Ba122 超导相本征凝固特性仍不明晰，所以无法给出问题的答案。本团队在近期利用高温原位实验并结合多种其它表征方式，系统阐明了 Ba122 相凝固过程中显微组织演化机制[1]，具体包括：利用超高温激光共聚焦显微镜(HT-CLSM)实现“熔-凝”过程原位观察，阐明了  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$  超导体凝固过程中 Fe-As 相的产生和调控机制。结合显微组织和磁性分析，确定高温 Fe-As 相来源于 Ba122 超导相的部分熔融。另外，我们发现在常规冷速凝固过程中 Fe-As 液相凝固受 " $\text{L} \rightarrow \text{Fe}_2\text{As} + \text{FeAs}$ " 和 " $\text{L} \rightarrow \text{Fe}_2\text{As} + \alpha\text{-Fe}$ " 两个共晶反应控制，在极慢冷速下还可以观察到额外的多元共晶反应 " $\text{L} \rightarrow \text{Ba122} + \text{Fe}_2\text{As} + \text{FeAs}$ "。本研究还给出了显微组织和超导性能间的构效关系并绘制了清晰的凝固路径图，为 Ba122 材料凝固工艺设计提供理论和实践支持。

## 参考文献

[1]Minghui Tang, Chiheng Dong, Zhongtang Xu, Cong Liu, Peng Yang, Chang Tu, Wenwen Guo, He Huang, Chao Yao, Dongliang Wang, Xianping Zhang, Yanwei Ma\*. Formation and modulation mechanisms of Fe-As phases in melting-processed  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  superconductor. Acta Materialia, 266 (2024) 119679.

**D16-28****加速器高场超导技术最新进展及新应用**

徐庆金

中国科学院高能物理研究所

粒子加速器是高场超导技术最重要的应用领域之一：磁场强度的提高，将直接推动加速器能量或亮度的提升，以及规模与造价的降低。从 20 世纪 70 年代起的四十余年，国际上已经完成多个基于高场超导技术的粒子加速器的建设。国内外目前正在建设和未来拟建设的高能量/高亮度加速器，均基于高场超导技术。本报告将对粒子加速器中高场超导技术的特点、挑战，及目前国内外最新进展，做简要的介绍，同时探讨加速器高场超导技术在高动能加载、空间发射以及超高密度储能等国家战略需求领域的前瞻应用。

**D16-29****基于高温超导材料的磁体技术及在聚变装置中的应用现状**

秦经刚\*

中国科学院等离子体物理研究所

在核聚变托卡马克装置中，应用超导技术的磁体系统可以生成强大的耦合磁场，从而实现高温、高密度和长约束时间的等离子体核聚变反应条件。目前，超导磁体中主要采用低温超导材料，如 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn，通过对超导体结构的不断优化和迭代，已经可以在 13 T 下实现稳定的电性能并保证托卡马克装置的长期可靠运行。然而，面对下一代聚变堆的发展需求，超导磁体系统需要产生高达 20 T 的高强度磁场。由于低温超导材料已无法满足这一需求，因此高温超导材料的应用变得至关重要。然而，高温超导材料与低温超导材料相比具有材料属性和制造技术方面的巨大差异，因此需要开发针对高温超导材料的应用工程技术，这将是未来聚变能技术发展中的一个重要挑战，但也是实现超过 20 T 磁场目标的关键一步。本文将主要介绍高温超导磁体的发展现状及面临的挑战。

**D16-30****液氮氟碳介质冷却高温超电工装备研究进展**邱清泉<sup>1,2</sup>, 肖立业<sup>1,2,3</sup>, 周志浩<sup>1,2,3</sup>, 靖立伟<sup>1,2</sup>, 滕玉平<sup>1,2</sup>, 宋乃浩<sup>1,2</sup>, 张京业<sup>1,2</sup><sup>1</sup> 中国科学院应用超导重点实验室<sup>2</sup> 中国科学院电工研究所<sup>3</sup> 中国科学院大学

在超电工和低温领域一般采用液氮作为制冷剂 and 绝缘介质，其工作温区通常为 65–77K。在液氮和液氢温区、液氮和液化天然气温区之间，尚缺乏合适的液体介质。以液氮/四氟化碳为代表的混合液体介质具有较低的凝固点和较高的沸点以及较好的绝缘特性和经济性，预期可在 50–100K 宽温区范围用于高温超电工装置的冷却和绝缘。本报告针对液氮/四氟化碳体系，首先介绍了混合介质的气-液-固相转变机制和流动传热特性，进一步讨论了其低温介电响应和绝缘击穿机理、以及冲击压缩响应和压力波传播模式，最终介绍了混合介质在高温超电工装备的应用案例。以超导能源管道、超导限流器、超导电抗器/储能磁体和超导背场磁体应用为例，着重讨论了其电磁性能和热稳定性，并与其它冷却方式进行了对比，验证了混合介质冷却超电工装备的技术优越性。

**D16-31****环氧浸渍 REBCO 超导线圈的脱层原位观测与解决方案初探**

宋彭, 杨置荣, 赵庆龙, 李怡然, 瞿体明\*

清洁高效透平动力装备全国重点实验室, 清华大学

超导线圈采用环氧树脂浸渍可以提高结构强度和热稳定性。但对于 REBCO 线圈而言, 由于环氧树脂和 REBCO 带材之间冷缩率不匹配而导致的带材脱层一直是困扰 REBCO 超导应用的重要问题。本项工作研究了采用 Stycast 2850FT 浸渍的 REBCO 线圈在降温过程中的温度、应力分布的演化过程, 通过原位测量研究了临界电流分布和脱层位点。对于外/内径比 $<1.93$ 的线圈样品, 没有发现明显的衰退现象。而对于外/内径比 $>2.37$ 的线圈样品, 观察到了明显的带材脱层和性能衰退现象。我们从结构计算分析, 临界电流衰退测量和显微观察这三个方面研究了 REBCO 线圈脱层的机理。我们发现在线圈降温到稳态温度之前脱层现象就以发生。随着温度降低, 线圈径向应力分布的峰值逐渐向线圈内匝移动, 导致线圈内匝更容易出现脱层。为解决环氧树脂浸渍后的 REBCO 线圈的脱层现象, 我们提出了一种在带材表面制备脱模涂层的工艺路线。脱模涂层可以降低树脂与带材表面的浸润性和结合力, 从而达到保护 REBCO 带材的目标。初步实验结果验证了该工艺的有效性。

**D16-32****超导磁体用可降解环氧树脂及其复合材料制备与性能研究**

黄荣进\*、赵俊婷、王涛

中国科学院理化技术研究所

以 YBCO 为代表的第二代高温超导带材由于具有更高的载流能力, 逐步成为超导材料工业应用的热点。由于超导层为离子晶体脆性材料, 采用环氧树脂封装提高机械性能是制备超导线圈的常用方法。然而由于环氧树脂与带材线膨胀系数的差异, 环氧封装的 YBCO 超导带材在冷却过程中, 各层之间会出现应力集中现象, 容易引起带材的层间分离, 导致超导性能发生严重的退化, 影响磁体的正常运行。环氧树脂固化后形成的三维交联网络保证了材料的力学性能与热稳定性, 但同时也决定了环氧树脂无法得到降解, 因此对于内部超导带材的问题无法进行修复。随着可逆共价键研究的进展, 使得环氧树脂相关材料的降解成为可能。本研究分别采用了六氢均三嗪及三羟甲基丙烷结构为核心, 采用酯键作为主要的连接方式, 引入不同含量的苯环结构与直链脂肪烃结构, 调控不同软硬段比例, 制备出了多种低温下应用的可降解环氧树脂, 并通过 FT-IR 及核磁共振谱进行了表征。选取适当的固化剂进行固化, 固化产物在室温及 77K 下的力学强度均高于传统的双酚 A 型环氧树脂。将其中粘度与固化条件适中的 TPH 树脂进行微米氧化铝的掺杂, 在 80 wt% 固含量的情况下, 77K 的导热系数可达  $1.22 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。通过特定的较为温和的降解条件, 所合成的固化产物均可以完成降解, 并具有较高的降解率。本研究旨在在不显著降低低温力学性能的前提下, 在环氧树脂结构中引入可逆共价键结构, 为今后 YBCO 超导线圈的修复提供了可能。

## D16-33

## 高温超导导体交流损耗研究进展

羊新胜\*

西南交通大学

高温超导导体具有高载流能力、高机械性能和各向异性低等特点,应用于需要强磁场或高载流能力的应用场合,如粒子加速和聚变等各种强场大型磁体中。当超导导体在磁场中使用时,变化的磁场会产生一定量的交流损耗,这会给制冷机带来负担,并对设备的热力学稳定性造成一系列负面影响。本次报告总结了交流损耗的机理、计算和分析方法、实验测试方法,以典型结构的高温超导导体结构为例,介绍了最近的研究结果并加以讨论、分析和展望。

## D16-34

## 10MJ 混合结构高温超导磁储能模块的设计和实验

马韬\*<sup>1</sup>、宋萌<sup>2</sup>、冯建情<sup>3</sup>

1. 北京交通大学

2. 广东电网有限责任公司

3. 西北有色金属研究院

高温超导磁储能装置能够实现对电网电压及频率的快速支撑,在新能源电网中具有较好的应用前景。为了降低储能磁体的漏磁场,大型的超导储能磁体可以采用环形磁体结构。与此同时,为了提高超导材料的利用率,还可以在不同磁场位置采用不同类型的超导材料或不同参数的同类型超导材料。我们提出了一种 10 MJ 的超导储能磁体设计方法,其运行于 20K 温区,由 16 个 D 型线圈组成的环形超导磁体结构。单个 D 型线圈的内部高场区域采用 YBCO 超导线圈,外侧低磁场区域采用低成本的 MgB<sub>2</sub> 超导线圈。为了降低超导线圈的电感值,我们采用了超导缆线来制作超导线圈,最大运行电流为 1.6kA,最高运行电压为 10kV。我们制作完成了 1 个 D 型线圈的制造和测试,最大稳态运行电流为 1.6kA,最高直流耐压为 15kV。

## D16-35

Nb<sub>3</sub>Sn 超导线非线性力学行为研究姜浪<sup>1,2\*</sup>, 张兴义<sup>2</sup>, 张胜楠<sup>1</sup>, 刘吉星<sup>1</sup>, 李建峰<sup>1</sup>, 张平祥<sup>1</sup>

1. 西北有色金属研究院

2. 兰州大学

Nb<sub>3</sub>Sn 超导线由于具备较高的临界磁场、临界电流和较好的力学性能,已经被运用到核聚变实验堆、核磁共振和强子环形对撞机等超导磁体构件中。一方面, Nb<sub>3</sub>Sn 超导线是一种典型的多丝复合材料,在外力作用下表现出很强的非线性力学行为。另一方面, Nb<sub>3</sub>Sn 超导导线的超导临界特性对应变非常敏感,较大的应变会导致其临界电流、临界磁场等超导临界性能发生退化。因此,研究 Nb<sub>3</sub>Sn 超导导线的非线性力学行为对预测和分析它的临界性能退化极其重要。本文首先通过实验研究了 300K 和 77K 温度下单根 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线准静态加载-卸载过程中非线性力学行为,实验结果发现:该复合材料在加载-卸载过程中应力-应变响应和能量损耗表现出很强的非线性,且随着塑性应变的增加卸载模量发生明显的退化。同时,建立了考虑卸载模量退化的双曲面弹塑性模型,推导出计及卸载模量退化的本构方程。随后,将该本构关系通过用户子程序 UMAT 嵌入到有限元中,对单根 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线在加载-卸载过程中的应力-应变曲线和能量损耗进行预测。对比发现不论是常温还是低温条件下 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线在加载-卸载过程中的应力-应变曲线和能量损耗计算结果与实验测量值定性定量吻合良好。另外,理论结果还揭示出准静态加卸载过程中能量耗散的非线性增长是由模量损伤退化引起的机制。

**D16-36****Design, fabrication and test of the REBCO insert magnets with pancake coils for high-field all superconducting magnet**

Xintao Zhang\*, Huajun Liu, Fang Liu, Jinggang Qin, Chao Zhou  
Institute Of Plasma Physics Chinese Academy Of Sciences

**Abstract:** In recent years, the Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (ASIPP) has been committed on the research of ultra-high field REBCO magnets with pancake coils for all superconducting hybrid magnets. In 2018 and 2019, 19.8 T and 24 T all superconducting magnets have been successfully obtained based on the REBCO insert coils and 70 mm 14 T low temperature superconducting (LTS) background field magnet. In later 2020, ASIPP and Tsinghua University launched a new project to design and manufacture of 35 T all superconducting magnet, which consists of a 15 T LTS background magnet and a 20 T REBCO insert magnet. We have successfully constructed and tested the 20 T REBCO insert magnet at 4.2 K in self-field. After successfully achieving the goal of 20 T magnetic field, the insert coils continued to charge to 300 A, and the maximum central magnetic field reached 24.1 T. In the first test under the LTS background magnet, the highest central magnetic field reached 32.4 T, in which the magnetic field contribution of the insert coil was 20 T, and more tests are underway.

**D16-37****基于时变 Ginzburg-Landau 理论与热效应的超导异质结构涡旋行为的稳定隐式算法**

汪庆渝<sup>1</sup>、薛存<sup>\*2</sup>

1. 西北工业大学航空学院
2. 西北工业大学力学与土木建筑学院

超导异质结构存在于各种超导器件中，如超导射频谐振腔中的 S-I-S 多层结构、超导电子器件中的双层结构以及超导线。研究超导异质结构的涡旋动力学对于促进超导异质结构的应用至关重要。时变 Ginzburg-Landau (TDGL) 理论是一种通过序参量  $\psi$  和磁矢势  $A$  描述来超导体中涡旋行为的有力工具。然而，超导异质结构中各组分的序参量、相干长度和 GL 参数的差异会给 TDGL 方程的数值求解带来重大挑战。同时，涡旋运动会带来能量耗散，这使我们必须考虑涡流运动所伴随的热效应。在本文中，我们提出了一种具有隐式格式的高效、稳定、易并行的有限差分算法，该算法通过 GPU 实现并行计算，能够用于求解超导异质结构的涡旋动力学行为。我们将 Jacobi 迭代方法应用于广义 TDGL-I 方程的求解，并对 TDGL-II 方程中的非线性源项进行线性化处理从而提高了算法的稳定性。将交替隐式算法与三对角阵算法或循环三对角阵算法相结合以求解不同边界条件下的 TDGL-II 方程和热扩散方程。该算法使我们能够在合理的计算时间内探索介观尺度的超导异质结构中考虑热效应的涡旋动力学行为，揭示和理解涡旋动力学行为背后的潜在物理机制，并有助于掌握、调整和优化异质超导结构系统的电磁性能。

## D16-38

## 基于同绕带和平衡电桥的高温超导绝缘线圈失超探测方法研究

张谦君\*、蒋乐乐

上海电机学院

基于同绕带（CWT, Co-wound Tape）补偿法与平衡电桥（BB, Balance Bridge）补偿法在 77K 下对 REBCO 绝缘线圈分别进行了不同运行工况下的失超探测研究。CWT 和 BB 补偿方法对励磁电流变化率低于 2A/s 的 HTS 磁体以及稳态电流下运行的 HTS 磁体具有良好的失超探测效果，并且可以检测到非常小的失超电压信号。同时，当励磁电流速率快时，CWT 和 BB 方法仍然能够快速准确地捕捉失超电压信号，同时有效地抑制噪声。CWT 方法能够检测同步失超事件，而 BB 方法不能。与 CWT 方法相比，BB 方法可以在一定程度上抵消励磁过程中动态电阻产生的电压影响。由于 CWT 和 BB 方法的互补性，CWT+BB 补偿方法是准确探测 HTS 绝缘磁体失超电压的有效方法。

## D16-39

## The Magnetic Field Impact on the Thermal Conductivity of Superconducting Niobium

Didi Luo<sup>\*1,2</sup>, Jing Zhang<sup>2</sup>

1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

2. 先进能源科学与技术广东省实验室

Particle accelerators extensively employ superconducting radio frequency (SRF) cavities as essential components. The performance of the SRF cavities hinges critically on the thermal conductivity of the superconducting materials they are composed of. Previous research has thoroughly investigated this matter. In the meantime, magnetic fields' influence on superconductors' Cooper pairs significantly affects thermal conductivity. With advancements in processing technology, the performance of SRF cavities has considerably improved. This has led to a significant increase in the acceleration gradient within the cavities, resulting in a magnetic field strength of almost 200 mT on the inner surface. This development has made the situation more critical. Thus, a more comprehensive and systematic study is needed to understand better the impact of magnetic fields on thermal conductivity and its effect on SRF performance. Thus, we introduced a thermal conductivity model for superconductors, including a magnetic field correction in the thermal conductivity calculations. The study involves theoretical calculations and experimental measurements of the thermal conductivity of small niobium samples at varying magnetic fields and temperatures. A comparative analysis was conducted to assess the congruence between the experimental results and our theoretical predictions. Finally, these results were used to estimate SRF cavities' performance, thereby enhancing their overall efficacy and reliability.

## D16-40

## 一种 NbTi 超导接头的制备与性能研究

张泽荣<sup>\*1</sup>、孟建利<sup>1</sup>、程军胜<sup>2</sup>

1. 中国科学院赣江创新研究院

2. 中国科学院电工研究所

高性能超导接头的制备对于超导磁体系统的稳定运行至关重要。对于常见的以 NbTi 超导线制造的超导磁体而言，焊料焊接法是制备 NbTi 超导接头普遍采用的方法之一。然而，采用低温焊料制备接头时，往往容易因液相收缩或界面弱结合而在接头内部形成孔洞等缺陷，最终影响接头性能和磁体稳定性。鉴于此，本文提出了一种在超导丝表面镀铜进而在焊料中浸泡的方法来制备 NbTi 超导接头。实验结果表明，通过镀铜操作有效地消除了 NbTi 丝与焊料之间的孔洞，形成了良好的结合界面。最终，接头在 600 A 的通流情况下，依然保持超导态；并且，在 1 T 背景磁场下对接头进行电阻测试，测得接头电阻可以达到 10-13  $\Omega$  量级，可以满足 NbTi 超导磁体的使用要求。

## 墙报

## D16-P01

## YBCO 超导复合带材失超传播有限元模型与分析

刘义能<sup>1</sup>、陈煌<sup>\*2</sup>、华凯<sup>2</sup>、刘方<sup>1</sup>、高鹏<sup>1</sup>

1. 中国科学院等离子体物理研究所-三室
2. 安徽理工大学

本文基于一维热传导方程及力学方程,通过 Comsol 软件建立 YBCO 带材一维/二维混合维度失超传播模型,系统模拟了带材的失超行为。基于该模型首先分析了 YBCO 单根短样带材在液氮环境,自场下的失超传播,在此基础上进一步研究了多根带材堆叠结构的失超特性。研究结果表明:YBCO 带材失超传播速度与温度、传输电流呈正相关;最小失超能量与温度、传输电流呈负相关,计算结果与实验结果吻合良好。在堆叠结构中,受绝缘层低热导率的影响,失超传播具有各向异性,纵向传播速度比横向传播速度高一个数量级,且在失超传播过程中存在因局部热膨胀而引起的应变下降行为。本模型计算精度较高,为失超保护系统的建立提供了一定的参考价值。

## D16-P02

## 化学蚀刻对 YBCO 涂层导体临界性能和结构的影响

王子明<sup>1,2</sup>、张新涛<sup>2</sup>、张振闯<sup>1,2</sup>、高硕尉<sup>1,2</sup>、刘方<sup>\*2</sup>

1. 中国科学技术大学
2. 中国科学院合肥物质科学研究院

金属层的腐蚀是  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) 涂层导体制备超导接头和探究超导层损伤的关键步骤。铜和银金属层需要从指定区域中完全去除,并保留较好的超导性能和微观结构。由于 YBCO 涂层导体对大多数无机溶液都较为敏感,因此在使用湿法蚀刻工艺去除金属层时,蚀刻条件会对带材性能产生显著的影响。我们系统地研究了氯化铁溶液蚀刻铜层时对 YBCO 涂层导体的晶体结构、微观形貌、临界电流和  $n$  值的影响,并得到了对涂层导体的临界电流几乎没有损伤的腐蚀参数。然而,当蚀刻条件变化时,我们发现超导性能的极大衰退,并研究了导致这种退化的根本原因。

## D16-P03

## Fe(Se,Te)薄膜中 Mn 掺杂效应研究

夏新月<sup>\*1,2</sup>、徐中堂<sup>1</sup>、张现平<sup>1</sup>、马衍伟<sup>1</sup>

1. 中国科学院电工研究所
2. 中国科学院大学

以 FeSe、FeSeTe 掺杂为代表的 11 型铁基超导体具有结构简单、元素组分少、可控性强等特点,在基础研究和应用研究方面都有比较大的潜力。本课题使用脉冲激光沉积生长了一系列不同 Mn 掺杂浓度的 Fe(Se,Te)薄膜  $\text{Mn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$ ,发现微量的 Mn 掺杂能够明显提高 Fe(Se,Te)薄膜的临界电流密度  $J_c$ ,仅仅 1% 的 Mn 掺杂( $x=0.01$ )后,其  $J_c$  能够提升至  $4.27\text{MA}/\text{cm}^2$  (4.2K、0T),为未掺杂样品的 1.74 倍。随着 Mn 的掺入以及掺杂浓度的提高,薄膜的临界电流密度呈现先增加后降低的趋势,而临界温度  $T_c$  则被逐步抑制。结合 TEM 的结果,对比未掺杂样品,掺杂后薄膜内部产生大量缺陷,这些缺陷作为钉扎中心,是导致  $J_c$  提升的原因之一。当掺杂浓度  $x$  增加到 5% ( $x=0.05$ ) 时,样品的  $J_c$  明显下降,推测可能是缺陷尺寸过大,已经无法起到钉扎的作用,反而会对薄膜的结构产生破坏。

## D16-P04

## 稀土元素掺杂对 NdBCO/YBCO 外延结构的制备及电输运性能研究

张嘉怡\*

西安理工大学

为研究稀土元素含量对超导薄膜结构和性能的影响,采用溶胶-凝胶法在 LAO(100)基板上制备了  $\text{Nd}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  和  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}(\text{NdYBCO/YBCO})$  复合薄膜,结果表明 NdYBCO/YBCO 复合薄膜呈外延生长,具有 c 轴取向和良好的面外、面内取向。与 NdBCO/YBCO 薄膜相比,在 NdYBCO/YBCO 薄膜中混合稀土元素可以获得更宽的生长参数窗口,为选择合适加工参数提供了更大的范围,这对涂层导体的工业生产非常重要。优化后的超导薄膜的  $T_c$  值随 Y 元素含量 x 的增加先增大后减小,较 NdBCO-YBCO 膜  $T_c$  值有较大提升,且薄膜在外加磁场作用下的电输运性能得到了显著改善。

## D16-P05

## 准绝热条件下 YBCO 带材失超特性研究

华凯<sup>1,2</sup>、刘义能<sup>1</sup>、陈煌<sup>\*1</sup>、刘方<sup>3</sup>、高鹏<sup>3</sup>、秦经刚<sup>3</sup>

1. 安徽理工大学

2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院

3. 中国科学院等离子体物理研究所

研究超导材料的失超特性是超导电力设备失超保护系统设计的关键一步。在准绝热条件下研究了 YBCO 带材在 4.2-70 K、0-10 T 磁场下的失超传播特性,包括其最小失超能和失超传播速度随电流、温度、磁场等变化的影响。研究发现,电流对失超传播速度影响显著,温度和磁场对其影响较小;最小失超能与温度和电流密切相关。将实验结果与数值模拟进行对比显示契合良好。该研究为优化 YBCO 带材在实际应用中的稳定性和可靠性提供了理论依据和实验支持。

## D16-P06

## 准一维光电半导体 BiSeI 中高压诱导超导电性

安超<sup>1</sup>、周健<sup>2</sup>、杨昭荣<sup>\*3</sup>

1. 安徽大学

2. 南京大学

3. 中国科学院强磁场科学中心

$\text{A}^{\text{VI}}\text{B}^{\text{VI}}\text{C}^{\text{VII}}$  ( $\text{A} = \text{Bi}, \text{Sb}; \text{B} = \text{S}, \text{Se}; \text{C} = \text{I}, \text{Br}$ ) 半导体体系为光电器件应用领域广泛研究的材料,且其电子态表现出高度可调谐性。这里,我们系统地研究了光电半导体 BiSeI 高压下的电输运、结构和分子振动性质。随着压力的增加,电阻曲线在  $P_c \sim 27.4 \text{ GPa}$  处出现低温下小的下掉,且在更高压 40.4 GPa 时达到零电阻,表明超导转变的出现。结合高压拉曼、同步辐射以及理论计算,我们证实该超导电性来源于空间群为  $P4/nmm$  的高压相。进一步加压,  $T_c$  起初随压力增加,随后在 40.4 GPa 以上保持几乎 5.6 K 的数值,表明该超导电性非常稳定。此工作有利于进一步通过高压手段在低维系统中探索奇异物性。

**D16-P07****Electromechanical properties of SS/Ag and Cu/Ag composite sheathed Ba122 tapes under uniaxial strain**

Xiao Liu<sup>\*1</sup>, Hongjun Ma<sup>1</sup>, Huajun Liu<sup>1</sup>, Yi Shi<sup>1</sup>, Zhan Zhang<sup>1</sup>, Yanchang Zhu<sup>2</sup>, Xianping Zhang<sup>2</sup>, Dongliang Wang<sup>2</sup>, Chiheng Dong<sup>2</sup>, Meng Han<sup>2</sup>, Wenchao Li<sup>2</sup>, WenWen Guo<sup>2</sup>, Yanwei Ma<sup>2</sup>, Fang Liu<sup>1</sup>, Jinggang Qin<sup>1</sup>

1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing, People's Republic of China

122-type iron-based superconductors (IBS) have attracted extensive attention due to their excellent performance. At present, Cu/Ag and SS/Ag composite sheath are mostly used to improve the mechanical properties of the IBS tapes. In the future, the practical IBS tapes will also be made of high-strength metal sheath. So this study has performed the tests of the Cu/Ag and SS/Ag composite sheathed tapes under various kinds of strain by the U-shaped bending spring devices. Both types of tapes were still reversible even when the applied compressive strain reached -0.55%. The reversible tensile strain limit of the Cu/Ag tapes were about 0.10%, while the irreversible tensile limit of SS/Ag tapes reached 0.25%, which is very advantageous for their practical application.