

国际首根百米量级铁基超导长线的研制

姚超 马衍伟[†]

(中国科学院电工研究所 北京 100190)

2016-09-14收到

[†] email: ywma@mail.iee.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20161007

2008年,日本东京工业大学Hosono研究组发现了临界转变温度为26 K的铁基超导体 $\text{LaFeAsO}^{[1]}$,随后中国科学家发现了临界温度超过40 K的 SmFeAsO 和 CeFeAsO 超导体,均突破了麦克米兰极限温度,表明铁基超导材料是继1986年发现的铜氧化物超导体之后的新型高温超导材料。根据母体化合物的组成比和晶体结构的不同,铁基超导材料包含若干不同的类型,除了上述首先发现的1111体系铁基超导体,还包括122体系($\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$, $\text{Sr}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$), 111体系(LiFeAs),以及11体系(FeSe)。各类铁基超导体在结构上都含有由铁元素(Fe)和氮族(P, As)或硫族(S, Se, Te)元素按1:1的原子比组成的导电层,以及不同的载流子库层^[2]。其中,1111和122体系的铁基超导体具有较高的超导转变温度(目前最高分别为58 K和38 K),并且二者的上临界场都可超过100 T,同时具有较小的各向异性,其单晶体的晶内临界电流密度均超过 10^6 A/cm^2 ,这些优异的物理特性表明,铁基超导体在高场强电领域有独特的应用优势,因此在工业、医学、国防等诸多领域具有广阔的应用前景,如核磁共振成像仪、高场磁体、电机、变压器、限流器、储能等^[3, 4]。

在强电应用中,制造超导电缆、绕制超导磁体等都需要使用超导带材。由于铁基超导材料本身硬度较高并且具有脆性,无法对其直接进行塑性加工,因此粉末装管法成为制备铁基超导带材的首选技术途径。粉末装管法工艺成本较低,易于规模化生产,并且已在 Nb_3Sn , Bi-2223 和 MgB_2 超导带材中实现了商业化生产。本研究组采用粉末装管法于2008年和2009年分别制备出国际首根1111型和122型铁基超导线材^[5, 6],其制备流程主要包括粉末装管—线材成型加工—线材热处理三个部分。由于线材金属包套中的超

导芯是多晶体,其中超导相的均匀性和相纯度,线材制备过程中产生的孔洞和微裂纹等缺陷,以及晶粒间的大角度晶界,都会影响整个超导线的传输临界电流的大小。因此,提高铁基超导线的载流性能是实现其应用的首要任务。本研究组通过采用前驱粉先位烧结提高超导相质量,采用化学元素掺杂提高晶粒连接性,并结合晶粒轧织结构化、超导相加压致密化等一系列制备工艺上的创新,使铁基超导带材的电流传输性能不断得到提升,并始终保持领先水平^[4, 7, 8]。2014年在热压制备的 $\text{Sr}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ (Sr-122)带材中,我们首次将铁基超导带材的临界电流密度提高至 10^5 A/cm^2 (4.2 K, 10 T)的实用化水平,如图1所示。由于铁基超导材料本身有极高的上临界场,带材的超导临界电流表现出极弱的磁场衰减特性,显示出其高场范围下的应用潜力^[9]。

在铁基超导带材短样性能不断获得提高的基础上,为了进一步推动其实用化进程,本研究组在国际上率先开展了多芯线带材制备工艺和线带

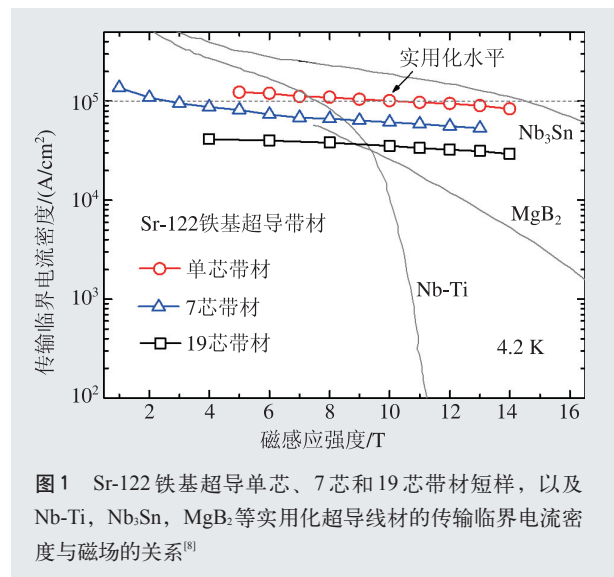


图1 Sr-122铁基超导单芯、7芯和19芯带材短样,以及Nb-Ti, Nb_3Sn , MgB_2 等实用化超导线材的传输临界电流密度与磁场的关系^[9]

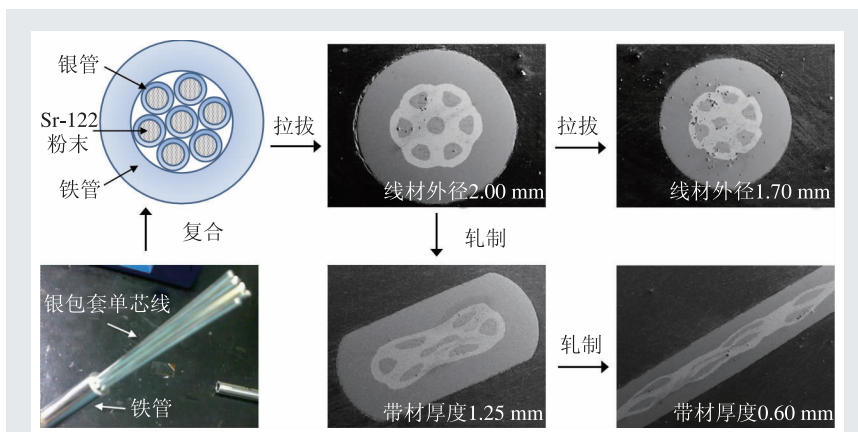
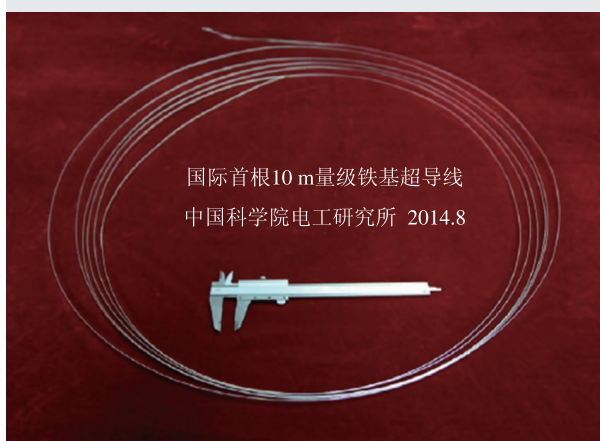
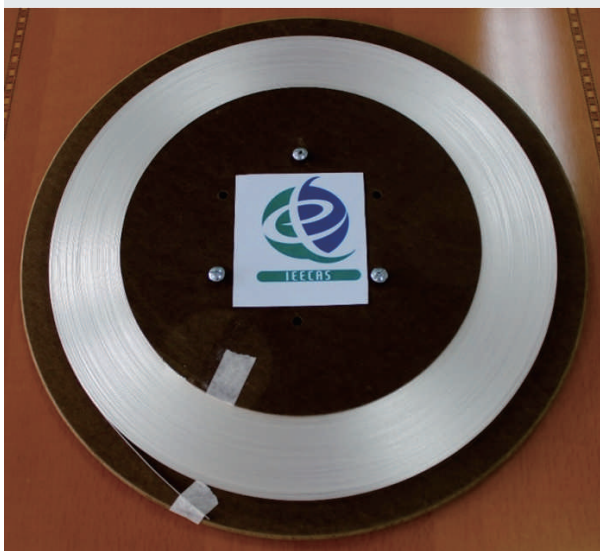
图2 Sr-122铁基超导多芯线带材的制备流程^[10]图3 国际首根10 m量级铁基超导导线^[11]

图4 国际首根100 m量级铁基超导导线

材规模化制备工艺的研究。在高场强电应用中，为了防止磁通跳动，减少交流损耗，必须使用复

合在金属基体中的多芯丝超导导线带材。本课题组以粉末装管法制备的单芯铁基超导线材为基础，将单芯线进行复合二次装管，通过对复合包套多芯结构在线材成型加工工艺路线的探索和优化，于2013年制备出国际首根高性能122型铁基超导多芯线带材(图2)^[10]。经热压工艺处理的7芯和19芯铁基超导带材在4.2 K, 10 T下同样展示出 $6.1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 和 $3.5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$

的高电流传输性能(图1)，为目前国际已报道的最高值。另一方面，线带材的规模化制备需要我们探索高致密度线材连续成型工艺。2014年，通过对制备过程中涉及的相组分与微结构控制、界面复合体均匀加工等关键技术的系统研究，本课题组采用连续轧制工艺成功研制出长度达11 m的高性能Sr-122铁基超导线材(图3)，线材的电流传输表现出良好的均匀性，其性能波动小于5%，整根线材的临界电流的平均值为 $1.84 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ (4.2 K, 10 T)^[11]。这是国际上首根10 m量级的铁基超导线材，标志着线材规模化制备走出的第一步。

对于铁基超导线材的产业化应用，突破百米量级的长线制备是其中的关键点，也是该领域应用研究的重大技术难点。目前，除了本课题组所在的中国科学院电工研究所，国际上在铁基超导线材的研制领域还有美国佛罗里达国家强磁场实验室、日本国立材料研究所、日本东京大学、意大利热那亚大学等^[12-15]，它们的相关研究还处于线材短样性能研究阶段，尚未开展线材规模化制备研究。在充分掌握高性能短样制备技术及对规模化制备工艺进行初步研究的基础上，本课题组通过对超导长线的结构设计和加工技术的试验优化，成功解决了铁基超导线规模化制备中的均匀性、稳定性和重复性等技术难点，于近日制备出了长度达到115 m的Sr-122铁基超导线材^[16]，如图4所示，经测试其载流性能表现出良好的均匀性和较弱的磁场衰减特性，在10 T高磁场下的临界

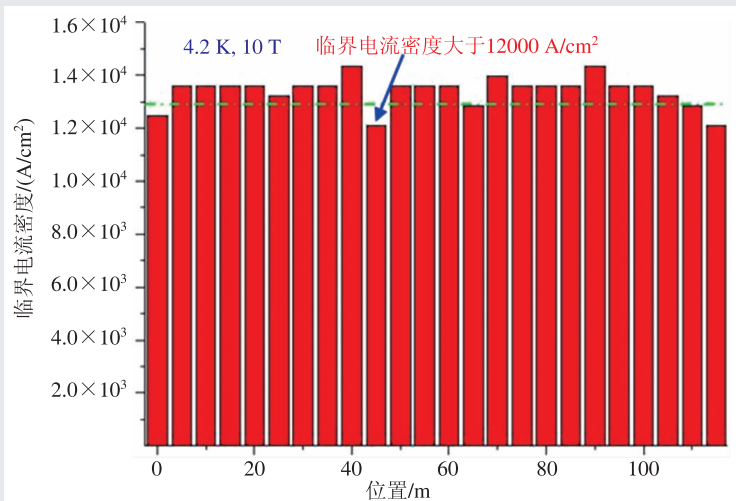


图5 国际首根 100 m 量级铁基超导导线的电流传输性能

电流密度超过 $1.2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ (4.2 K, 10 T), 如图 5 所示。

国际首根 100 m 量级铁基超导长线的成功研制, 开创了铁基超导材料从实验室研究走向产业化进程的里程碑, 奠定了铁基超导材料在工业、医学、国防等诸多领域的应用基础。目前, 铁基超导长线的电流传输性能还有很大的提升空间, 本课题组未来将进一步优化长线的制备工艺, 继续提高超导芯的载流性能, 从而不断降低超导线的成本, 最终为我国超导产业链的创新发展和产业升级提供新的动力。

参考文献

- [1] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M *et al.* J. Am. Chem. Soc., 2008, 130:3296
- [2] Hosono H, Kuroki K. Physica C, 2015, 514:399
- [3] Tanabe K, Hosono H. Jpn. J. Appl. Phys., 2012, 51:010005
- [4] Pallecchi I, Eisterer M, Malagoli A *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2015, 28:114005
- [5] Gao Z S, Wang L, Qi Y P *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2008, 21:105024
- [6] Qi Y P, Zhang X P, Gao Z S *et al.* Physica C, 2009, 469:717
- [7] Ma Y W. Supercond. Sci. Technol., 2012, 25:113001
- [8] Lin H, Yao C, Zhang X P *et al.* Sci. Rep., 2014, 4:6944
- [9] Zhang X P, Yao C, Lin H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2014, 104:202601
- [10] Yao C, Ma Y W, Zhang X P *et al.* Appl. Phys. Lett., 2013, 102:082602
- [11] Ma Y W. Physica C, 2015, 516:17
- [12] Weiss J D, Tarantini C, Jiang J *et al.* Nature Mater., 2012, 11:682
- [13] Gao Z S, Togano K, Matsumoto A *et al.* Sci. Technol., 2015, 28:012001
- [14] Pyon S, Yamasaki Y, Kajitani H *et al.* Sci. Technol., 2015, 28:125014
- [15] Malagoli A, Wiesenmayer E, Marchner S *et al.* Sci. Technol., 2015, 28:095015
- [16] Zhang X P, Oguro H, Yao C *et al.* Oral Presentation at the Applied Superconductivity Conference, September 4—9, 2016, Denver, USA

HySpex



- 机载、地面两用
- 高光谱成像光谱仪
- 在中国唯一有实际飞行测试数据的国际品牌

SIGMAKOKI

西格玛光机



- 应用系统
- 纳米位移台
- 光学镜片*镜架
- 手动电动位移台

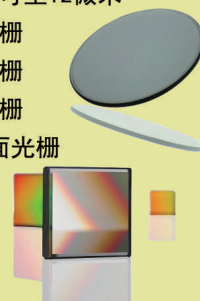
Lambert Instruments

- 增强型高速 CCD/CMOS 相机
- 灵敏度可达单光子水平, 最小 2ns 选通时间并具有最高 5000Hz 的帧频



SPECTROGON

- 滤光片波长可至 12 微米
- 平面衍射光栅
- 激光调谐光栅
- 脉冲压缩光栅
- Rowland 凹面光栅



努美 (北京) 科技有限公司

电话: 010-6202 9100

传真: 010-8011 5555-522977

邮箱: info@nmerry.com

网址: www.nmerry.com