



非对称应力策略使得铁基超导材料的磁通钉扎显著增强

期刊：	中国科学: 物理学 力学 天文学
稿件ID：	SSPMA-2025-0401
稿件栏目：	亮点
作者提交日期：	2025-09-17
参与作者列表：	闻海虎
关键词：	铁基超导, 磁通钉扎, 非对称应力策略, 强磁场应用
英文关键词：	
学科领域：	超导和强关联体系
专题：	

非对称应力策略使得铁基超导材料的磁通钉扎显著增强

闻海虎*

南京大学物理学院, 南京 210093

*联系人, hhwen@nju.edu.cn

摘要: 铁基超导体具有各向异性度小, 上临界磁场高的特点, 因此其磁通涨落和磁通运动行为较弱, 有利于制备出适用于强磁场环境使用的超导磁体。然而, 即便有这些优点, 要有效地钉扎住磁通, 提升强磁场下的无损耗载流能力仍然很困难。本文介绍了中国科学院电工研究所马衍伟团队与合作者一起, 利用一种新的非对称应力策略, 在铁基超导材料 $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ 中导致很多 1 埃左右的原子滑移形变区域, 产生了高密度弯曲交错的位错, 对磁通起到非常强的钉扎作用。他们用这种技术制备的超导带材在 4.2K, 10 特斯拉磁场下仍然具有 $4.5 \times 10^5 A/cm^2$ 的临界电流, 而且在 32 特斯拉磁场下仍然有 $2 \times 10^5 A/cm^2$ 的临界电流。这项突破性进展使得铁基超导材料有希望成为制备出强磁场超导磁体的理想材料, 在未来受控核聚变, 高能加速器和强磁场核磁成像领域取得应用。

关键词: 铁基超导, 磁通钉扎, 非对称应力策略, 强磁场应用

PACS: 74.70.Xa, 74.25.Wx, 74.25.Op, 74.25.Sv

超导体的一个重要特征是无损耗传输极大的超导电流 (其临界电流密度 J_c 可高达 10^6 - $10^7 A/cm^2$)。根据金兹堡-朗道理论的分类, 超导体可以分成 I 类和 II 类, 绝大部分超导体都是 II 类超导体。II 类超导体有一个重要特性, 当外加磁场超过下临界磁场 H_{c1} 的时候,

1
2
3 磁场可以进入超导体，形成量子化的磁通线，其磁通量为 $\Phi_0 = h/2e$ （ h 为普朗克常数， e
4
5 为电子电量）。此时的状态被称为混合态（mixed state），简单理解就是超导和磁场混合存
6
7 在。这种量子化的磁通线如果被缺陷钉扎住，超导体仍然可以承载无损耗的巨大超导电流。
8
9
10 因此基于这个特点，可以利用 II 类超导体绕制超导磁体，产生极强的磁场，用于受控核聚
11
12 变，高能加速器和强磁场核磁成像等领域。

13
14
15
16
17
18 磁通线只有通过合适的缺陷或无序才能被钉扎住。通常 II 类超导体的临界电流与单位
19
20 长度磁通线的钉扎力（ f_{pin} ）之间具有 $f_{pin} = \Phi_0 J_c$ 的关系，可见临界电流与钉扎力直接成正
21
22 比。对于一个超导体，如果超导转变温度高，意味着可能在高温下实用，因此一般会有较强
23
24 的热涨落行为（即磁通线离开其平衡态位置较远），磁通体系容易发生融化现象，从而磁通
25
26 发生运动，失去无损耗载流能力^[1]。如果超导体二维性很强，或称各向异性度高，磁通线就
27
28 很容易被截断，热涨落效应尤其强，如层状性很强的铜氧化物超导体 Bi-2212 就是如此。
29
30
31 所幸的是铁基超导体的层状性不强，如 $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$ （简称为 BaK122）铁基超导体，其临
32
33 界温度可达 38-40K，各向异性度只有 2 左右。除此之外，铁基超导体的上临界磁场可以很
34
35 高。有实验表明，该材料在 10K 左右，上临界磁场可以高达 100 特斯拉^[2]。这两个特征使
36
37
38 得铁基超导体，尤其是 BaK122，具备在液氦温区制备成强磁场磁体的巨大潜力。

39
40
41
42
43
44
45
46 要真正实现铁基超导体的强磁场应用，仅靠材料中已存在的缺陷和位错起到对磁通的钉
47
48 扎作用是不够的。而且，在制备线带材的过程中，晶粒边界处的弱连接对超导电流限制性很
49
50 大^[3]。中国科学院电工研究所马衍伟团队长期致力于铁基高温超导体线带材在强磁场下的应
51
52 用研究。他们通过热压、等静压高温处理方式，大大改善了晶界处的弱连接问题，使得临界
53
54 电流有很大提升^[4]。但是常规加工过程中形成的缺陷和有序对磁通的钉扎力还不是足够强。
55
56
57
58
59
60

最近, 他们利用一种非对称应力策略(asymmetric-stress-field extrusion), 在铁基超导材料 BaK122 中导致很多 1 埃左右的原子滑移形变区域。在此区域内他们观察到高密度倾斜弯曲的位错, 而且交织在一起, 对磁通起到非常强的钉扎作用。他们利用这种技术制备 BaK122 导线, 测量发现在 4.2K, 10 特斯拉磁场下, 该导线具有 $J_c=4.5\times 10^5\text{A/cm}^2$ 的临界电流, 而且在 32 特斯拉磁场下仍然有 $2\times 10^5\text{A/cm}^2$ 的临界电流^[5]。此处高磁场下临界电流指标达到原有技术制备的导线的 5 倍。在铁基超导材料的应用基础研究领域中这是一个突破性进展, 为利用铁基超导材料制备出强磁场磁体迈出了关键的一步。

参考文献

1. Wen Hai-Hu. Brief introduction to flux pinning and vortex dynamics in high temperature superconductors. *Acta Phys. Sin.*, 2021, 70: 017405 [闻海虎. 高温超导体磁通钉扎和磁通动力学研究简介. 物理学报, 2021, 70: 017405].
2. Tarantini C, Gurevich A, Jaroszynski J, et al. Significant enhancement of upper critical fields by doping and strain in iron-based superconductors. *Physical Review B*, 2011, 84:184522.
3. Cheng Z, Dong C, Yang H, Zhang Q, Awaji S, Gu L, Wen H.-H, Ma Y. Strengthened proximity effect at grain boundaries to enhance inter-grain supercurrent in $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ superconductors. *Materials Today Physics*, 2022, 28: 100848.
4. Huang, H. et al. High transport current superconductivity in powder-in-tube $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ tapes at 27 T. *Supercond. Sci. Technol.* 2022, 31: 015017.
5. Han M, Dong C, Yao C, et al. Asymmetric Stress Engineering of Dense Dislocations in Brittle Superconductors for Strong Vortex Pinning. *Adv. Mater.*,

1
2
3 2025, e13265.
4
5
6
7
8
9

10 **Breakthrough of enhancing vortex pinning in iron-based superconductors**

11
12
13 Hai-Hu Wen*
14
15

16 School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China
17
18

19 One of the important applications of superconductors is to make them into superconducting
20 magnets which can produce extremely high magnetic fields. While this application relies how
21 strong the vortices are pinned by the defects or dislocations in a type-II superconductor. Here I
22 introduce a recent collaborated work carried out by the group led by Prof. Yanwei Ma in the
23 Institute of Electrical Engineering of CAS. They adopted a new strategy called
24 asymmetric-stress-field extrusion which produces a high density of dislocations in iron-based
25 superconductors (IBS). This method can activate shear-driven lattice slip and twisting under
26 superimposed hydrostatic compression to produce atomic displacements of about 1 Å. The
27 superconducting wire made by this method holds an extremely high value of critical current
28 density under high magnetic field: $J_c = 4.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (4.2K, 10T), and $2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (4.2K, 32T).
29 This work paves a route to tailor the pinning landscapes in high temperature superconductors,
30 leading to a final application of high field magnets for the purposes of nuclear fusion, high energy
31 accelerator and magnetic resonance image.
32
33
34
35

36 **Keywords:** iron-based superconductor, flux pinning, asymmetric-stress-field
37
38
39 extrusion, application of high magnetic fields
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60