

基于质子辐照 YBCO 超导带材临界电流提升技术研究

朱晓锋¹⁾²⁾ 张素平¹⁾²⁾ 张宁³⁾ 周洪吉¹⁾²⁾ 王川¹⁾²⁾
潘高峰¹⁾²⁾ 李鹏展¹⁾²⁾ 汪洋¹⁾²⁾ 张天爵^{1)2)†}

1) (中国原子能科学研究院, 核技术综合研究所, 北京 102413)

2) (中核集团加速器工程技术研究中心, 北京 102413)

3) (上海大学理学院, 上海市高温超导重点实验室, 上海 200444)

(2025 年 8 月 1 日收到; 2025 年 10 月 27 日收到修改稿)

为提升钇钡铜氧 (YBCO) 高温超导带材的临界载流能力, 本文创新性地采用质子辐照技术对工程实用化 YBCO 带材进行缺陷调控. 基于 4.5 MV 静电加速器材料辐照终端, 系统开展了 3 MeV 质子束流在不同注量下的辐照实验, 成功在超导体中构建高密度、低维度的可控人工钉扎中心. 这种缺陷工程通过为磁通线创造低能量钉扎位点, 显著抑制了磁通蠕动现象并增强钉扎作用, 从而显著削弱外磁场对临界电流 (I_c) 的抑制作用. 实验数据显示, 在注量率为 8×10^{16} p/cm² 的辐照条件下, 样品在 4.2 K@6.5 T 极端工况下的临界电流实现了 8 倍的突破性提升, 同时在 20 K@5 T, 30 K@4 T 下临界电流密度最大提升因子分别也达到 5.5 倍、4.8 倍. 这一性能突破显著增强了超导带材在低温高场环境中的应用潜力, 尤其适用于离子加速器、聚变反应堆等对高性能超导磁体有迫切需求的前沿领域. 研究证实, 离子辐照技术无需改变 YBCO 带材的现有制备工艺, 即可通过缺陷工程实现临界性能的高效优化, 为超导材料的实用化性能调控提供了一条工艺兼容性强、可行性高的技术路径.

关键词: YBCO, 质子辐照, 钉扎中心, 临界电流密度

DOI: 10.7498/aps.75.20251031

CSTR: 32037.14.aps.75.20251031

1 引言

随着钇钡铜氧 (yttrium barium copper oxide, YBCO) 高温超导材料在工程技术领域的应用拓展, 尤其在可控核聚变、高能强流离子加速器、超级高铁、超导电机等下游场景的突破, 高温超导带材的需求量呈指数级增长^[1,2]. 这些前沿应用对超导带材在特定工况下的性能提出了严苛要求, 例如可控核聚变装置与高能离子加速器的磁体系统, 为实现更高场强与能量效率, 要求材料在强磁场中仍

需保持优异的载流能力. 因此, 深入研究其在复杂条件下的临界特性, 并探索提升临界性能的有效途径, 成为当前工程应用亟须解决的难题.

在超导材料的工程应用中, 临界电流密度 (即给定条件下无损耗承载的最大电流密度) 是核心指标. 对于 YBCO 而言, 高磁场环境下的临界电流密度显著低于实际需求, 根本原因在于磁场引发的洛伦兹力导致磁通涡旋运动加剧^[3]. 实验数据显示, 在低温高场或中温中场条件下, 其临界电流性能通常衰减至自场环境的 10%—20%, 这已经成为高温超导材料被广泛应用的巨大障碍之一^[4,5]. 由此可见, 提升 YBCO 超导材料在强磁场环境下的临界

† 通信作者. E-mail: tjzhang@cnnmail.cn

性能已刻不容缓.

研究表明, 在 YBCO 带材内部引入不同维度的缺陷作为人工钉扎中心以构建特定应用场景下的最佳复合钉扎图景, 是提升临界电流性能的关键策略^[6]. 该技术的核心挑战在于: 铜氧化物高温超导体其相干长度较短, 为取得有效的磁通钉扎效果, 人工引入的钉扎缺陷尺度必须在纳米量级^[7], 以及如何通过调控钉扎缺陷的密度、维度与尺寸, 实现对材料在特定温度、磁场及运行电流下性能的精准优化, 即在第二代高温超导 (second generation high-temperature superconductivity, 2G-HTS) 带材中构筑高效磁通钉扎结构. YBCO 薄膜缺陷可分为两类: 原子空位、位错、晶界等本征钉扎中心, 以及通过人工手段引入的外来缺陷 (人工钉扎中心, artificial pinning centers, APCs). 目前, APCs 的引入方法主要包括基底表面修饰、稀土元素替代、纳米第 2 相掺杂和离子辐照^[8-12]. 相较于其他方法, 离子辐照技术在构筑微结构工程中展现出独特优势^[13]: 通过调节离子种类、能量、注量及入射角等外部参数, 可在不改变材料生长条件的前提下, 精确控制辐照缺陷的尺寸、形貌、密度与取向. 近年来, 国内外研究团队针对稀土钡铜氧化物 (rare earth barium copper oxide, REBCO) 涂层导体, 开展了离子辐照改性研究并取得进展. 表 1 汇总了 Au, He, Ar, Ta 等离子辐照实验结果^[14-17], 显示不同离子在各温区与磁场下均能提升带材的临界电流性能. 尽管效果存在差异, 但均有效提高了 REBCO 带材在匹配温度及磁场内的临界电流密度.

表 1 不同离子、能量、注量对 REBCO 的临界电流性能的提升

Table 1. Enhancement of the critical current density of REBCO by different ions, energies, and fluence.

离子种类	能量 /MeV	流强 /nA	注量/(ions·cm ⁻²)	J_c	备注
Au	18	120	6×10^{11}	$\uparrow 2.5$	27 K@3 T
He	2.5	200	3×10^{15}	$\uparrow 1.8$	10 K@7 T
Ar	2.5	120	5×10^{11}	$\uparrow 2.2$	10 K@7 T
Ta	1900	—	5×10^{11}	$\uparrow 4.4$	10 K@7 T

本文借助北京大学物理学院的 4.5 MV 静电加速器进行了质子对上海上创超导科技有限公司 YBCO 超导带材的辐照实验^[18], 并借助综合物性测量系统 (physical property measurement system, PPMS)、临界电流密度测试仪等设备开展了辐照带材的宏观临界性能的测试. 探索不同辐照参数与超导带材的临界特性之间的关系, 并验证未来工程化卷对卷辐照超导带材工艺技术的可行性.

2 YBCO 超导带材的 SRIM 模拟及辐照实验

2.1 YBCO 带材的制备

实验样品采用的是上海上创超导科技有限公司提供基于金属有机沉积法 (metal organic deposition, MOD) 制备、宽度为 12 mm, 标准商用带材经 BHO 掺杂的 YBCO 超导样品, 其样品组成为 2 μm Ag 层、1.2 μm YBCO 层、0.1 μm MgO+LMO 层、0.09 μm Al₂O₃+Y₂O₃ 层、50 μm

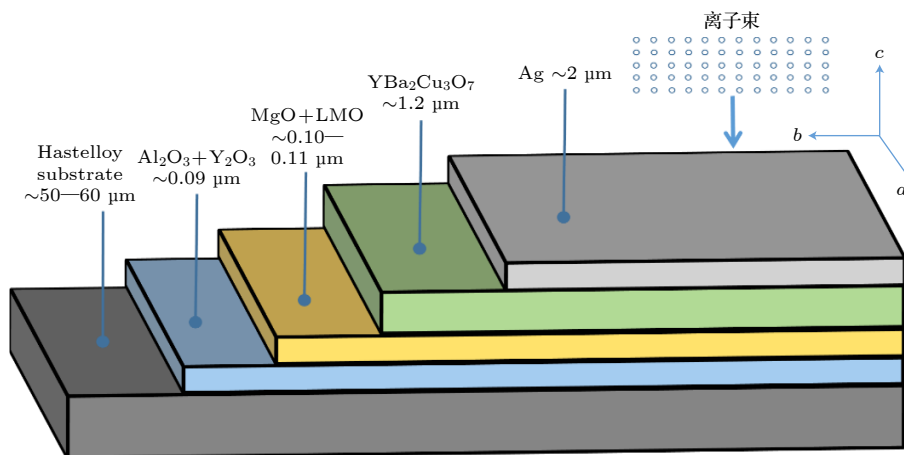


图 1 超导带材结构示意图

Fig. 1. Structure of high-temperature superconducting tape.

哈氏合金层, 如图 1 所示. 该样品宽度为 12 mm, 在 77 K、自场下临界电流为 540 A. 为了便于辐照实验的开展, 用机械法将原始带材裁剪成 12 mm×20 mm 的短样带材, 利用导电胶将样品粘贴到八面体旋转靶上, 采用导电胶是便于通过旋转靶直接测量样品辐照的注量.

2.2 SRIM 模拟

采用 SRIM (stopping and range of ions in matter) 程序中 TRIM(transport of ions in matter) 模块模拟了质子束辐照下 YBCO 超导层中的离子浓度和损伤随深度的分布^[19,20]. 计算中设定质子能量为 3 MeV, 注量分别为 1×10^{15} , 5×10^{15} , 1×10^{16} , 5×10^{16} 和 8×10^{16} p/cm², Y, Ba, Cu, O 元素的移位能分别为 90, 22, 30 和 28 eV, 样品密度约为 6.3 g/cm³, 原子密度约为 7.40×10^{22} atoms/cm³. 由于 3 MeV 的 H⁺ 离子能够完全穿透 Ag 层和 YBCO 涂层 (其在 Ag 层中的射程约为 36 μ m, 如图 2 所示), 因此当 H⁺ 穿过 2 μ m Ag 层到达 YBCO 涂层表面时, 其能量降至 2.6 MeV. 2.6 MeV 的 H⁺ 在 YBCO 超导体中的射程约为 37 μ m, 远大于薄膜厚度, 故绝大部分入射离子将沉积在超导带材基底和铝靶基座中, 超导层内的离子注入效应可忽略. 此外, 辐照过程中电离能损占入射离子总能量损失的 99.93%, 因此在本实验中, H⁺ 主要通过电子能损方式将能量沉积于 YBCO.

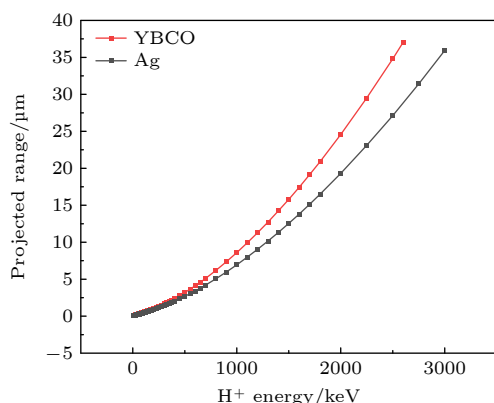


图 2 H⁺ 在 Ag 和 YBCO 中的射程

Fig. 2. Range of H⁺ in Ag and YBCO.

图 3 展示了 5 种不同辐照注量下样品内引入离位损伤的分布曲线, 损伤程度以原子平均离位 (displacement per atom, dpa) 表示, 其中 dpa 定义为在给定辐照注量下, 晶格原子被轰击逸出其初

始位置的次数与晶格原子总数之比. 结果表明, 离位损伤随辐照注量的增大而显著增大.

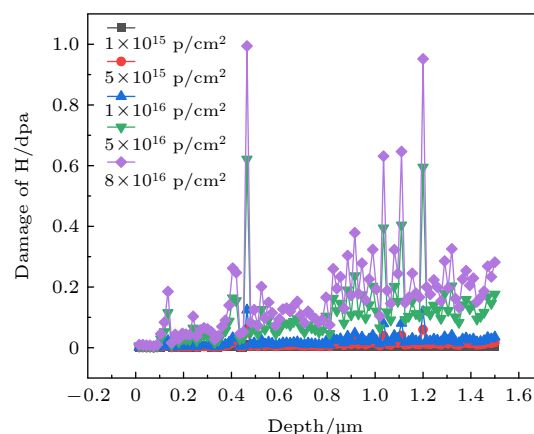


图 3 5 种不同辐照注量下样品中引入离位损伤

Fig. 3. Simulated displacement damage by H⁺ ion irradiation at five different doses.

2.3 4.5 MV 静电加速器及辐照实验

本次实验所采用的离子加速器是北京大学物理学院的 4.5 MV 静电加速器, 在其新增设质子/氦温控辐照系统, 开展高温超导带材临界性能辐照改性研究, 如图 4 所示. 该系统能够实现能量范围为 0.7—3.5 MeV 的质子辐照, 最大离子束流强度可达 1000 nA^[18]. 受实验设施自身条件限制, 实际束流强度可能存在小幅波动. 实验在室温、真空环境下对 YBCO 超导层进行质子辐照, 到达样品表面的质子能量为 3 MeV, 辐照注量范围为 1.0×10^{15} — 8.0×10^{16} ions/cm². 辐照过程中, 质子束流强度始终维持在 800—1000 nA. 表 2 是所有辐照样品的实验条件及详细说明. 为了便于一次开机完成多个样品的辐照实验, 实验终端为一八面体的旋转靶, 将不同实验条件的样品分别通过碳胶粘贴到八面体上, 如图 5 所示, 通过束流积分仪来得到积累的电荷量, 从而获得带材上注量.

表 2 超导带材辐照注量

Table 2. Irradiation fluence of superconducting tape.

离子种类	样品	能量/MeV	流强/nA	注量/(p·cm ⁻²)
H	超导带材	3	1000	1×10^{15}
				5×10^{15}
				1×10^{16}
				5×10^{16}
				8×10^{16}

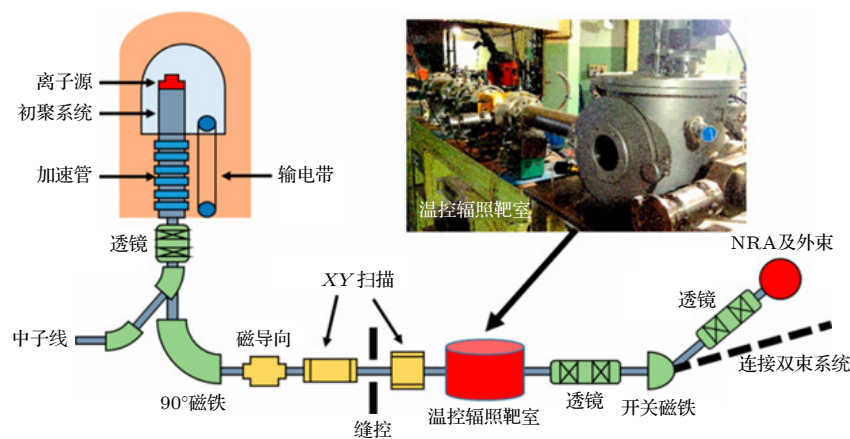
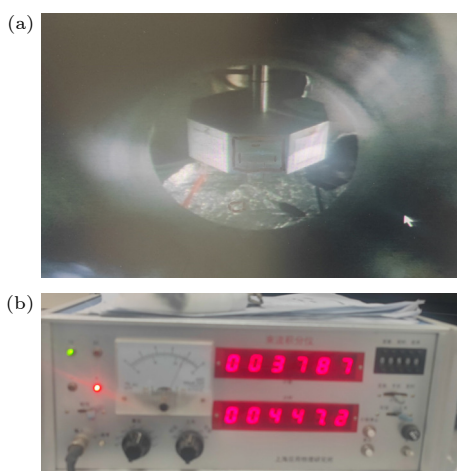
图 4 4.5 MV 静电加速器结构示意图^[2]Fig. 4. 4.5 MV electrostatic accelerator^[2].

图 5 超导带材辐照实验 (a) 八面体旋转靶; (b) 束流积分仪

Fig. 5. Irradiation experiment of superconducting tape: (a) Octagonal rotating target; (b) beam integrator.

2.4 超导样品表征方法

测试台架: 临界电流密度扫描仪是一种基于单线圈感应法的测量系统, 通过监测超导体在交变磁场中产生的三次谐波电压 ($3f$), 实现其临界电流密度 (J_c) 和转变温度 (T_c) 的非破坏性测定^[21]. 其原理基于超导体的完全抗磁性和磁通钉扎特性: 当超导体进入临界态 ($J \geq J_c$) 时, 磁通渗透引发的非线性电磁响应会导致 $3f$ 分量显著增强, 据此可标定 J_c . 该技术无需对样品直接通电, 特别适用于超导材料关键性能参数的无损表征.

采用 PPMS 测试辐照前后样品的超导性能^[21]. 测量时, 将辐照后的样品裁剪为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 置于探测线圈中心, 使其以固定频率和振幅作微振动. 基于电磁感应原理, 样品磁矩的变化会在其

周围的探测线圈中感应出变化的磁通量, 进而产生感生电压. 该电压信号经锁相放大器放大和记录后, 通过已知的电压-磁矩转换关系, 即可计算出样品的磁矩 (M) 或磁化率变化量 (δ). 基于此, 可获得样品的 B - H 曲线、 M - H 曲线及初始磁化曲线等数据.

Mag-T (magnetic-temperature) 系统对薄膜施加电压并测量相应电流, 是一种研究薄膜材料电学输运性质 (尤其是磁电输运性质) 的核心实验测试系统.

3 YBCO 超导带材辐照的超导性能表征

通过借助 PPMS 综合物性测试平台、Mag-T 系统、临界电流密度扫描仪, 开展了经过不同注量的质子辐照后超导带材的临界电流测试、 M - H 曲线测量. Mag-T 系统对薄膜施加电压以及相对应的电流进行测试, 得到不同温度下的电学变化信号, 这种信号变化类似磁化率的相对变化, 以此来判定超导临界转变温度. 原始样品带材的 T_c 为 90.5 K , 随着辐照注量的增大, 其带材的转变温度也在逐渐降低, 当注量增大到 $8 \times 10^{16}\text{ p/cm}^2$ 时, 其转变温度降到约为 82.5 K , 且其转变宽度也在明显增大, 如图 6 所示. YBCO 超导带材转变温区的宽度与超导相分布的有序度密切相关, 当超导带材中超导相具有较高的有序度时, 相应超导转变温区狭窄. 因此随着注量的增大, 超导带材中超导相的有序度剧烈降低, 从而导致超导转变温区也逐渐增宽.

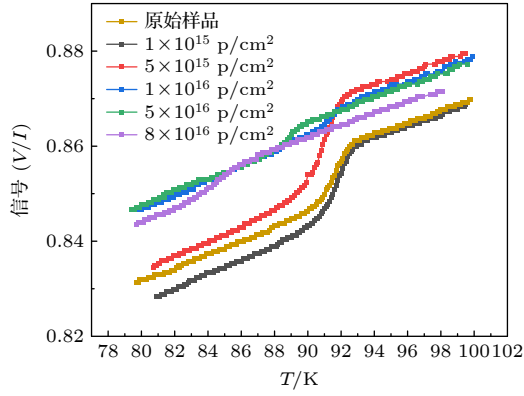


图 6 不同注量下 YBCO 高温超导带材的超导转变温度曲线
Fig. 6. Superconducting transition temperature curve of YBCO high temperature superconducting tapes at different doses.

在磁场方向垂直于 YBCO 超导带材 ab 面的条件下, 测量了不同注量的质子辐照后样品的磁滞回线, 基于 Bean 模型计算获得了临界电流密度 J_c , 并进一步计算了带材的提升因子, 以直观地反映 YBCO 样品在场性能的变化^[22]. J_c 的表达式为

$$J_c = \frac{20\Delta M(H)}{a(1 - a/3b)}, \quad (1)$$

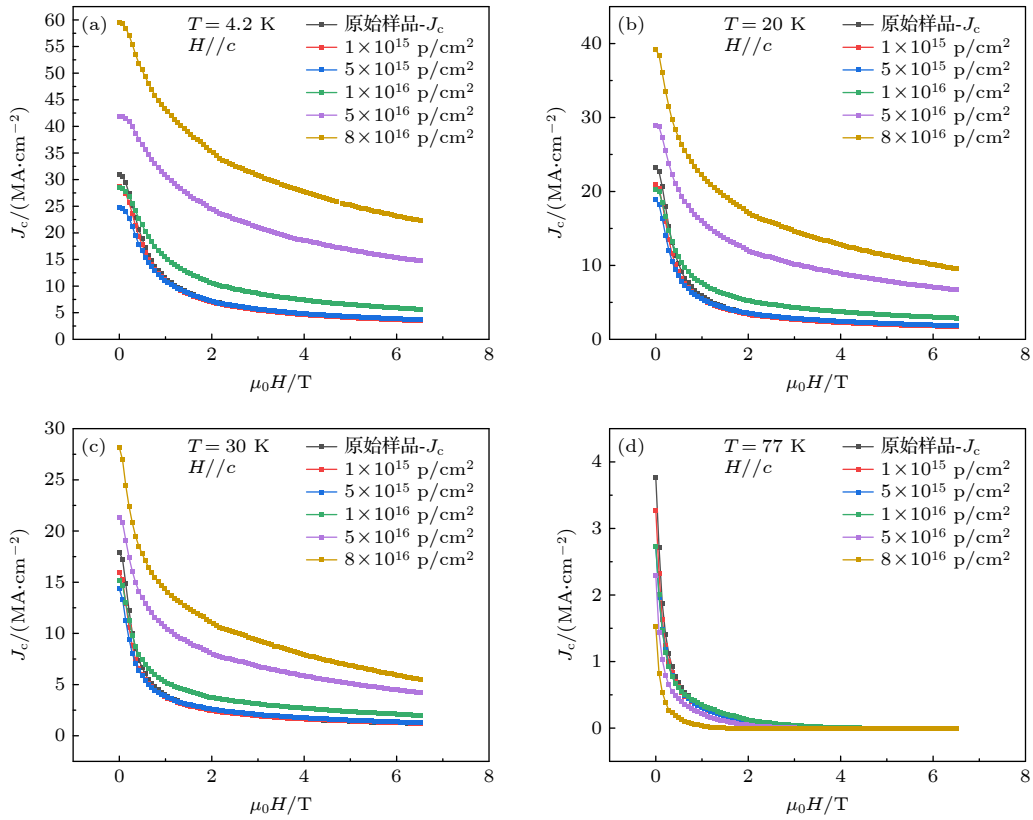


图 7 不同温度环境不同注量下超导带材临界电流密度随磁场的变化

Fig. 7. Variation of the critical current density of superconducting tapes with magnetic fields under different temperature zones and magnetic fields.

式中, a, b 为超导带材垂直于 c 轴方向的实际平面呈正交方向的尺寸, 且 $a < b$; ΔM 为超导带材磁滞回线上同一外场条件下对应的单位体积磁化强度之差; A 为超导带材的超导层截面面积. 测试与计算结果如图 7 所示.

从图 7 可以看出, 随着辐照注量的增大, 超导带材在磁场下的临界电流密度整体呈现增大的趋势, 且随着注量的增大在低温高场下临界电流密度的提升因子越明显. 从图 8 可以看出, 当注量为 $8 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2$ 时, 其在 $4.2 \text{ K}@6.5 \text{ T}$ 下超导带材的临界电流密度最大提升因子达到 8 倍, 由于受限于设备测量范围 (磁场为 $0-6.5 \text{ T}$), 从测量曲线趋势上看, 随着磁场的增大提升因子会进一步增大. 从图 8(d) 可以得到, 在 $20 \text{ K}@5 \text{ T}$, $30 \text{ K}@4 \text{ T}$ 下临界电流密度最大提升因子分别也达到 5.5 倍和 4.8 倍. 在同一注量下, 超导带材在不同的温度及磁场下, 其临界电流密度的提升因子不同, 主要是由于 YBCO 在不同的工作环境中, 影响其临界电流密度的因素不同. 钉扎中心对磁通涡旋的钉扎能力受所处环境磁场强度、超导体本征缺陷以及所

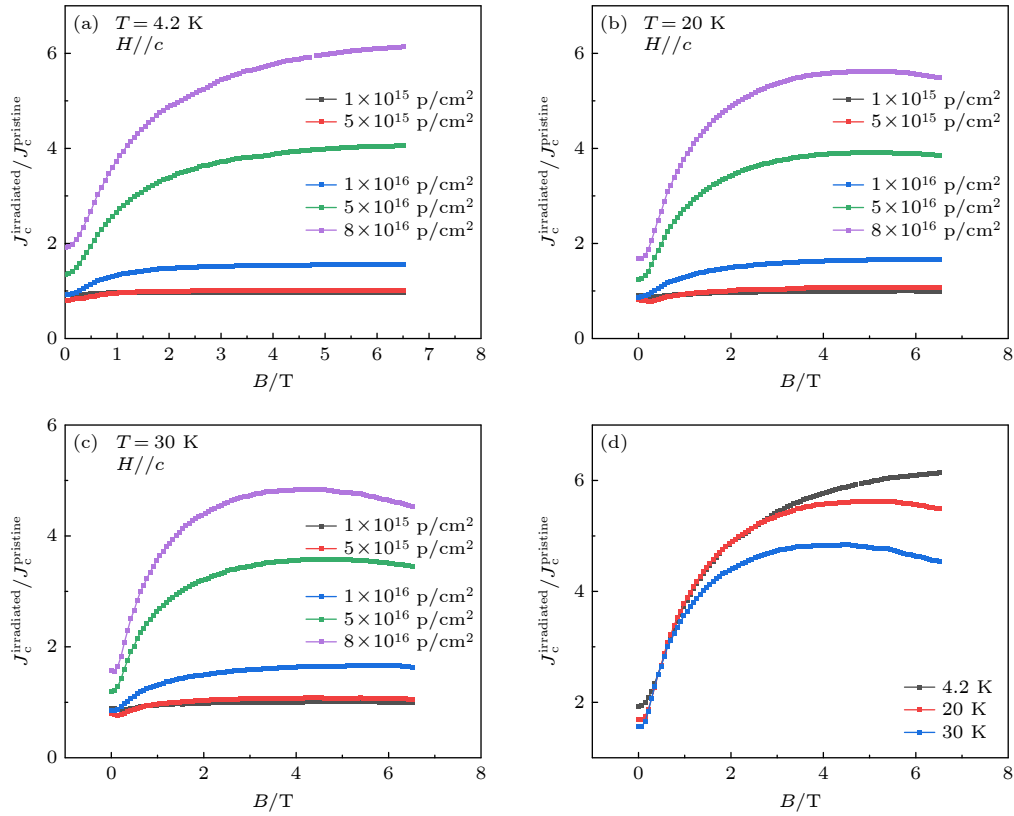


图 8 (a)–(c) 不同温度环境下不同注量的超导带材提升因子随磁场的变化; (d) 注量为 8×10^{16} p/cm² 时, 不同温度的超导带材提升因子随磁场的变化

Fig. 8. (a)–(c) Enhancement factor of superconducting tapes with different flux levels under magnetic fields at different temperatures; (d) enhancement factor of superconducting tapes at different temperatures with the magnetic field at a flux of 8×10^{16} p/cm².

处环境温度扰动的影响^[21]. 因此, 在不同工作环境下, YBCO 超导体中起主导作用的钉扎中心类型各异. 通常将超导带材的工作温场范围划分为: 1) 高温低场 ($T > 65$ K, $B < 1$ T); 2) 中温中场 (20 K $< T < 65$ K, 1 T $< B < 5$ T); 3) 低温高场 ($T < 20$ K, $B > 5$ T). 在高温低场环境下, 强烈的温度扰动显著弱化了各向同性弱钉扎中心的作用, 此时主要由柱状缺陷、晶界等各向异性强钉扎中心主导钉扎行为. 在中温中场环境下, 各向异性的强钉扎中心与各向同性的弱钉扎中心共同形成混合钉扎图景, 共同作为主要的钉扎中心. 而在低温高场环境下, 温度扰动效应减弱, 同时磁通涡旋尺寸 (即超导相干长度) 减小, 使得各向同性的点缺陷成为主要的钉扎中心. 而从图 7 和图 8 可以看出, 质子辐照后超导带材在中温中场下具有一定的提升能力, 在低温场下其临界电流密度具有较高的提升. 说明质子辐照在超导带材内部本征缺陷的基础之上植入了更多小尺寸的点缺陷 (空位、间隙原子等) 及少量空位簇, 与超导相干长度相当均是

在 nm 量级, 更容易形成有效钉扎中心, 这些晶体缺陷与磁通涡旋之间的相互作用阻止磁通线的运动, 从而提高 J_c . 辐照的带材是由上海上创超导科技公司生产的 YBCO 带材, 为了提升超导带材临界性能, 其掺杂了一些 BHO 纳米晶, 在带材生长的过程中形成一些本征缺陷. 这些本征缺陷和质子辐照的缺陷在低温高场下有相互协同作用, 进一步提升了超导带材的临界电流密度. 因此采用质子辐照工艺, 在一定的注量下, 超导带材的临界电流密度在中温中场、低温高场均有很大的提升, 尤其在低温高场下的临界电流密度提升更是明显.

为了进一步探究超导带材临界电流密度对磁场的依赖性, 分别绘制了不同温度下, 注量为 8×10^{16} p/cm² 时超导带材在双对数坐标下 J_c -B 的对数曲线, 如图 9 所示, 使用 $J_c \propto B^{-\alpha}$ 幂指数模型对对数曲线进行拟合, 得到在不同注量下幂参数 α 的值, 其大小可反映带材 J_c 的场依赖性, α 越大, 表明带材 J_c 随磁场衰减越快. 由图 9 可知, 在 4.2 K, 20 K, 30 K 三个温区下, 随着注量的增大,

α 均呈下降的趋势, 在注量为 8×10^{16} p/cm² 时, 对应 4.2 K, 20 K, 30 K 三个温区下, 相应的 α 值分别降到 0.276, 0.361, 0.397. 这表明质子辐照样品内植入大量有效的钉扎中心, 以及在越低的温区时会形成更多有效的强钉扎中心, 降低超导带材临界电流密度对磁场的依赖性.

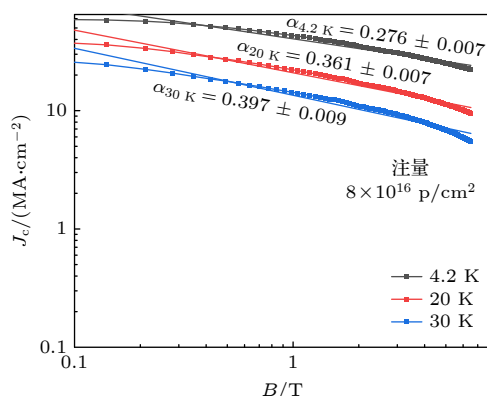


图 9 温度不同时, 在对数坐标下超导带材临界电流密度随磁场的变化

Fig. 9. Critical current density of superconducting tape with magnetic field at different temperatures on logarithmic coordinates.

4 结 论

本文针对工程实用化 YBCO 超导带材, 借助离子加速器开展了质子辐照下不同注量对超导带材临界电流的提升研究, 分别从超导转变温度、超导临界性能、临界电流密度对磁场依赖性等, 进行辐照前后超导带材的对比分析. 随着辐照注量的增大, 在超导带材内部植入高密度的点缺陷 (空位、间隙原子等) 及少量空位簇, 相应超导相的减少, 因此随着注量的增大, 超导带材中超导相的有序度剧烈降低, 从而导致超导转变温区也逐渐增宽. 质子辐照在超导带材内部形成的缺陷与高温超导带材在中温中场、低温高场下的相干长度尺寸一致, 均在 nm 量级, 而质子辐照在超导带材内部形成的点缺陷 (空位、间隙原子等) 成为主要的钉扎中心, 这些晶体缺陷与磁通涡旋之间的相互作用可阻止磁通线的运动, 从而提高 J_c . 在注量为 8×10^{16} p/cm² 时, 其在 4.2 K@6.5 T 下超导带材的临界电流密度最大提升因子达到 8 倍, 同时在 20 K@5 T, 30 K@4 T 下临界电流密度最大提升因子分别也达到 5.5 倍和 4.8 倍. 使用 $J_c \propto B^{-\alpha}$ 幂指数模型对对数曲线进行拟合, 在 4.2 K, 20 K, 30 K 三个温

区下临界电流密度随磁场的变化曲线, 得到的幂参数 α 分别为 0.276, 0.361, 0.397. 这表明质子辐照后的超导带材在越低的温区时会形成更多有效的强钉扎中心, 降低超导带材临界电流密度对磁场的依赖性. 综上所述, 离子辐照技术无需改变 YBCO 带材的现有制备工艺, 即可通过缺陷工程实现临界性能的高效优化, 为超导材料的实用化性能调控提供了一条工艺兼容性强、可行性高的技术路径.

感谢北京大学物理学院 4.5 MV 静电加速器核材料平台提供的辐照实验服务.

参考文献

- [1] Kwok W K, Ulrich W, Glatz A, Koshelev A E, Kihlstrom K J, Crabtree G W 2016 *Rep. Prog. Phys.* **79** 116501
- [2] Kwon C, Kinder L R, Gim Y, Fan Y, Coulter J Y, Maley M P, Foltyn S R, Peterson D E, Jia Q X 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 1575
- [3] Haberkorn N, Miura M, Baca J, Maiorov B, Usov I, Dowden P, Foltyn S R, Holesinger T G, Willis J O, Marken K R, Izumi T, Shiohara Y, Civale L 2012 *Phys. Rev.* **85** 174504
- [4] Xavier O, Teresa P 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 044003
- [5] Yuh S, Takahiro T, Masateru Y 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 010007
- [6] Sato S, Honma T, Takahashi S, Sato K, Watanabe M, Ichikawa K, Takeda K, Nakagawa K, Saito A, Ohshima S 2013 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** 7200404
- [7] Macmanus-Driscoll J L, Foltyn S R, Jia Q X, Wang H, Serquis A, Civale L, Maiorov B, Hawley M E, Maley M P, Peterson D E 2004 *Nat. Mater.* **3** 439
- [8] Zhou Y X, Ghalsasi S, Rusakova I, Salama K 2007 *Supercond. Sci. Technol.* **20** S147
- [9] Jia Y, LeRoux M, Miller D J, Wen J G, Kwok W K, Welp U, Rupich M W, Li X, Sathyamurthy S, Fleshler S, Malozemoff A P, Kayani A, Ayala-Valenzuela O, Civale L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 122601
- [10] Leroux M, Kihlstrom K J, Holleis S, Rupich M W, Sathyamurthy S, Ieshler S, Sheng H P, Miller D J, Eley S, Civale L, Kayani A, Niraula P M, Welp U, Kwok W K 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 192601
- [11] Fischer D X, Prokopec R, Emhofer J, Eisterer M 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 044006
- [12] Khadzhai G Y, Litvinov Y V, Vovk R V, Zdorovko S F, Goulatis I L, Chroneos A 2018 *J. Mater. Sci. Mater. El.* **29** 7725
- [13] Biswal R, John J, Behera D, Kanjilal D, Avasthi D K, Mishra N C 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **1063** 245
- [14] Civale L, Marwick A D, Worthington T K, Kirk M A, Thompson J R, Krusin-Elbaum L, Sun Y, Clem J R, Holtzberg F 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 648
- [15] Gu Y, Cai C B, Liu Z Y, Liu J, Liu L, Huang R T 2021 *J. Appl. Phys.* **130** 085304
- [16] Rupich M W, Sathyamurthy S, Fleshler S, Li Q, Solovoyov V, Ozaki T, Welp U, Kwok W K, Leroux M, Koshelev A E, Miller D J, Kihlstrom K, Civale L, Eley S, Kayani A 2016

- IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 6601904
- [17] Eley S, Leroux M, Rupich M W, Miller D J, Sheng H, Niraula P M, Kayani A, Welp U, Kwok W K, Civale L **2017** *Superconductor Science Technology* **30** 015010
- [18] Gao Y, Wang J Y, Yang X J, Gong J H, Lu X C **2015** *Nucl. Phys. Rev.* **32** S1 (in Chinese) [高原, 王建勇, 杨向军, 龚建华, 路祥臣 **2015** 原子核物理评论 **32** S1]
- [19] Zhao P, Wang J Q, Chen M Q, Yang J X, Su Z X, Lu C Y, Liu H J, Hong Z Y, Gao R **2024** *Acta Phys. Sin.* **73** 087401 (in Chinese) [赵珀, 王建强, 陈梅清, 杨金学, 苏钺雄, 卢晨阳, 刘华军, 洪智勇, 高瑞 **2024** 物理学报 **73** 087401]
- [20] Dan M, Chen L J, He Y B, Lü X W, Wan J H, Zhang H, Zhang K J, Yang Y, Jin F Y **2022** *Acta Phys. Sin.* **71** 237401 (in Chinese) [但敏, 陈伦江, 贺岩斌, 吕兴旺, 万俊豪, 张虹, 张珂嘉, 杨莹, 金凡亚 **2022** 物理学报 **71** 237401]
- [21] Li M J **2018** *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai University) (in Chinese) [李敏娟 **2018** 博士学位论文 (上海: 上海大学)]
- [22] Cui X M, Liu G Q, Wang J, Huang Z C, Zhao Y T, Tao B W, Li Y R **2007** *Physica C* **466** 1

Technology for enhancing critical current of YBCO superconducting tapes via proton irradiation

ZHU Xiaofeng¹⁾²⁾ ZHANG Suping¹⁾²⁾ ZHANG Ning³⁾ ZHOU Hongji¹⁾²⁾
 WANG Chuan¹⁾²⁾ PAN Gaofeng¹⁾²⁾ LI Pengzhan¹⁾²⁾
 WANG Yang¹⁾²⁾ ZHANG Tianjue^{1)2)†}

¹⁾ (Department of Nuclear Technology and Application, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

²⁾ (China National Nuclear Corporation Accelerator Engineering Technology Research Center, Beijing 102413, China)

³⁾ (Shanghai Key Laboratory of High Temperature Superconductors, College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(Received 1 August 2025; revised manuscript received 27 October 2025)

Abstract

This research adopts an innovative method, i.e. proton irradiation technology, for realizing defect control in practical engineering yttrium barium copper oxide (YBCO) tapes, in order to improve the critical current density of YBCO high-temperature superconducting tapes in high magnetic fields. Based on the material irradiation terminal of the 4.5 MV electrostatic accelerator at Peking University, systematic irradiation experiments are conducted using 3 MeV proton beams on YBCO superconducting tapes at different fluence rates, successfully constructing high-density, low-dimensional controllable artificial pinning centers in the high superconducting tapes. This defect engineering significantly suppresses the flux creep phenomenon and enhances the pinning effect by creating low-energy pinning sites for flux lines, thereby significantly weakening the inhibitory effect of external magnetic fields on critical current (I_c). Comparative analysis of superconducting tapes before and after irradiation is conducted, including superconducting transition temperature, superconducting critical performance, and dependence of critical current density on magnetic field. As the irradiation dose increases, high-density point defects (vacancies, interstitial atoms, etc.) and a small number of vacancy clusters are implanted inside the superconducting tape, resulting in a corresponding decrease in the superconducting phase. Therefore, as the dose increases, the orderliness of the superconducting phase in the superconducting tape decreases sharply, leading to a gradual widening of the superconducting transition temperature zone. By measuring the hysteresis loops of samples irradiated with different doses of protons and calculating the critical current density J_c based on the Bean model, the experimental data show that under irradiation conditions with a fluence rate of 8×10^{16} p/cm², the critical current of the sample under extreme operating conditions of 4.2 K and 6.5 T achieves an 8-fold breakthrough improvement. Meanwhile, the maximum improvement factors in critical current density at 20 K and 5 T and 30 K and 4 T are also 5.5 times and 4.8 times, respectively. The logarithmic curve is fitted using the $J_c \propto B^{-\alpha}$ power exponent model, with the

† Corresponding author. E-mail: tjzhang@cnnmail.cn

power parameter α values of 0.276, 0.361, and 0.397 for the variation of critical current density with magnetic field in three temperature ranges of 4.2 K, 20 K, and 30 K, respectively. This indicates that the superconducting tape irradiated with protons will form more effective strong pinning centers at lower temperatures, reducing the dependence of the critical current density of the superconducting tape on the magnetic field. This performance breakthrough significantly enhances the application potential of high superconducting tapes in low-temperature and high magnetic fields environments, especially in frontier fields such as particle accelerators and fusion reactors, where there is an urgent demand for high-performance superconducting magnets. This work confirms that the proton irradiation technology can efficiently optimize critical performance through defect engineering without changing the existing preparation process of YBCO tapes, thereby providing a highly feasible and process-compatible technical path for realizing the practical performance control of superconducting materials.

Keywords: YBCO, proton irradiation, pinning centers, critical current density

DOI: [10.7498/aps.75.20251031](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251031)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251031](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251031)



基于质子辐照YBCO超导带材临界电流提升技术研究

朱晓锋 张素平 张宁 周洪吉 王川 潘高峰 李鹏展 汪洋 张天爵

Technology for enhancing critical current of YBCO superconducting tapes via proton irradiation

ZHU Xiaofeng ZHANG Suping ZHANG Ning ZHOU Hongji WANG Chuan PAN Gaofeng LI Pengzhan WANG Yang ZHANG Tianjue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 010803 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251031

CSTR: 32037.14.aps.75.20251031

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251031>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

$\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 超导带材中掺杂相对 He^+ 离子辐照缺陷演化及超导电性的影响

Effect of doping on evolution of He^+ ion irradiation defects and superconductivity in $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting strips

物理学报. 2024, 73(8): 087401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240124>

质子辐照下正照式和背照式图像传感器的单粒子瞬态效应

Single event transient effect of frontside and backside illumination image sensors under proton irradiation

物理学报. 2022, 71(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211838>

质子辐照 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 基钙钛矿太阳能电池的损伤效应

Proton irradiation induced damage effects in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -based perovskite solar cells

物理学报. 2023, 72(13): 138802 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222100>

质子辐照作用下浮栅单元的数据翻转及错误退火

Data inversion and erroneous annealing of floating gate cell under proton radiation

物理学报. 2022, 71(11): 118501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212405>

增强型Cascode结构氮化镓功率器件的高能质子辐射效应研究

High-energy proton radiation effect of Gallium nitride power device with enhanced Cascode structure

物理学报. 2023, 72(1): 012401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221617>

BaZrO_3 纳米晶添加的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 涂层导体性能提升研究

Research on enhancing the performance of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductor through the incorporation of BaZrO_3 nanocrystals

物理学报. 2025, 74(19): 197401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250728>