

采用 NdBCO/MgO 籽晶的楼层式批量化制备 YBCO 超导块材*

崔艳兰¹⁾³⁾ 武婷婷²⁾³⁾ 刘玉光³⁾ 杨万民^{3)†}

1) (山西大同大学物理与电子科学学院、固体物理研究所, 大同 037009)

2) (山西工程科技职业大学基础课教学部, 太原 030619)

3) (陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(2026 年 1 月 26 日收到; 2026 年 3 月 8 日收到修改稿)

REBCO 高温超导块材性能卓越、前景广阔, 但制造成本阻碍其工业化应用, 现有批量化制备方式在产能和成本上有很大优化空间. 基于此, 本研究聚焦工艺创新以降本增效, 推动其产业化应用. 研究采用顶部籽晶熔渗生长 (TSIG) 法制备 NdBCO/MgO 自供给籽晶. 经 MgO 掺杂将籽晶熔点从 1090.5 °C 提升至 1102.3 °C, 自然解理获得高熔点复合籽晶. 研究结合籽晶熔融织构法 (SMG)、“楼层式”结构及固相包裹籽晶技术实现 YBCO 超导块材高效批量化制备. 同时, 通过 SEM 观测样品微观形貌, 揭示了“楼层式”结构对 YBCO 超导块材性能的影响机制. 所制备的三层直径 28 mm 样品 (S1, S2, S3), 平均最大捕获磁场 ($B_{\max}$) 分别为 0.35 T, 0.39 T, 0.40 T (77 K, 0.5 T), 捕获磁场率超 76%, 平均最大磁悬浮力 ($F_{\max}$) 分别为 62.5 N, 73.2 N, 75.5 N (77 K, 0.5 T), 保持了优异性能. 本研究提出的“楼层式”结构, 在保障 YBCO 块材高性能的同时, 显著地提升制备效率, 为其低成本工业化应用提供了有效技术路径.

关键词: NdBCO/MgO 复合籽晶, 楼层式批量化结构, YBCO 超导块材, 捕获磁场, 磁悬浮力

DOI: 10.7498/aps.75.20260143

CSTR: 32037.14.aps.75.20260143

1 引言

REBCO (RE = Y, Gd, Sm, Nd, La 等稀土元素) 高温超导块材因具有高的捕获磁场 (B_{tr})、强的临界电流密度 (J_c)、高的临界转变温度 (T_c)、大的磁悬浮力 (F_L) 及良好的自稳定磁悬浮等特性, 已成为极具应用前景的功能材料. 目前, 其综合性能已满足工业应用需求. 例如, 通过堆叠两个直径为 25 mm 的 GdBCO 块材, 在 26 K 下实现了 17.6 T 的捕获磁场^[1]; 直径 20 mm 的 GdBCO 块材的磁悬浮力密度已达 17.3 N/cm² (77 K, 0.5 T)^[2]; 而

掺入质量分数为 7% 的 YGdBa₄CuNbO_y 第二相纳米颗粒的 GdBCO 块材, 其 J_c 提升至 8.64×10^4 A/cm² (77 K)^[3]. 因此, REBCO 超导块材已成功应用于电机、磁轴承、储能系统, 便携式核磁共振仪以及高温超导磁悬浮列车等领域^[4-10], 其中高温超导钉扎磁悬浮列车被认为是最具吸引力的应用方向之一. 推动其产业化应用的关键在于实现 REBCO 块材的批量化与低成本制备.

在迈向工业化应用的进程中, REBCO 超导块材制造成本成为了亟待攻克的关键难题. 为了降低成本, 批量生产是必不可少的. 一方面通过改进籽晶制备工艺, 提高单畴成品率. 科研工作者已研

* 国家自然科学基金 (批准号: 52072229)、教育部科学技术研究重大项目 (批准号: 311033)、山西省基础研究计划 (批准号: 202503021212240, 202203021222326) 和山西省高等学校科技创新计划 (批准号: 2024L318) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangwm@snnu.edu.cn

究尝试多种方法,如 Cai 和 Fujimoto^[11]通过脉冲激光沉积 (PLD) 技术在 MgO 单晶衬底上外延生长 Nd123 薄膜,并成功诱导低熔点 YBCO 超导块材生长;文献 [12–14] 分别以自制 Y123/MgO, Sm123/MgO, Nd123/MgO 薄膜为籽晶,利用薄膜籽晶过热性质,成功地实现 YBCO^[12], SmBCO^[13], NdBCO^[14] 超导块材的定向生长,验证了 RE123 薄膜籽晶在 REBCO 系列超导块材制备中的通用性;Muralidhar 等^[15]同样采用 Nd123/MgO 薄膜籽晶,成功实现了 GdBCO 超导块材的批量熔融织构生长;Bierlich 等^[16]利用 MgO 单晶诱导不同晶粒取向 SmBCO 生长,经切割制得大量 Sm123 籽晶,此过程耗时较多;Wu 等^[17]通过 Ag₂O 掺杂降低 SmBCO 熔点,并以 Nd123 籽晶成功诱导单畴 SmBCO 块材.与此同时,科研工作者通过晶体生长法获得高熔点籽晶.如 Hari Babu 等^[18,19]采用熔融法 (MG) 研究 MgO 在 (Nd-123+12 mol% Nd-422+ x wt%) 体系中的掺杂影响,至少使 NdBCO 籽晶熔点提升了 15 °C,并成功诱导生成 SmBCO 超导块材;Namburi 等^[20]通过熔渗 (IG) 法制备了具有更高的熔点的 Mg-NdBCO 籽晶,其孔隙率得到有效改善相较于 MG 方法.另一方面,提高生产规模与能源利用效率也至关重要.Muralidhar 等^[21,22]利用顶部籽晶熔融织构 (TSMG) 法成功制备了系列直径 24—45 mm GdBCO 超导块材^[21],还单批次批量化制备了 12 个直径 24 mm 的高性能大尺寸 GdBCO 超导块材^[22];Gawalek 等^[23]以 SmBCO 为籽晶,批量制备出 16 个 38 mm×38 mm×17 mm 方形 YBCO 超导块材,成功用于电机与轴承;Shi 等^[24]则采用 (Nd-123+20 mol% Nd-422)+1.0 wt% MgO 复合籽晶,实现了性能优良的 GdBCO-Ag 块材的批量制备;Ren 等^[25]通过引入 MgO 衬底减少液相流失,优化工艺后,82% 的样品磁悬浮力密度超过 10 N/cm² (77 K, 0.5 T);Yu 等^[26]在 MgO 基底上沉积 NdBCO 薄膜作为籽晶,采用分层诱导方式生长 YBCO 块材,两层直径 16 mm 超导块材的平均磁悬浮力分别达到 20.5 N 和 19.3 N (77 K, 0.5 T),同时检验了籽晶的热稳定性.现有批量化制备方式普遍采用“平行堆叠”或“分立生长”结构,在进一步提升单炉产能和降低综合成本方面仍存在空间利用率低,籽晶使用效率不高等问题.

综合考虑批量化应用需求、籽晶制备原材料成本、减少对商用籽晶的依赖等方面,本文采用顶部

籽晶熔渗生长 (TSIG)^[27–30]法制备 NdBCO/MgO 籽晶,研究了 MgO 在 [Nd211+0.2BaCuO₂+1% CeO₂+ x % MgO] 体系中的掺杂影响,其中掺杂浓度单位是质量分数.大量籽晶可通过自然解理高效获得,实现批量籽晶的自供给.尤为重要的是,提出的“楼层式”批量化制备 YBCO 超导块材工艺,有效利用炉体纵向空间,实现籽晶的双倍应用并提高能源利用效率.同时检验籽晶在批量化应用中的稳定性,为 REBCO 超导块材工业化应用奠定研究基础.

2 实验内容

2.1 制备 NdBCO/MgO 籽晶

本文通过 TSIG 法制备 NdBCO 籽晶.首先,采购了纯度为 99% 的 BaCO₃, Nd₂O₃, Y₂O₃, CuO, MgO 和 CeO₂ 商用粉末.然后,通过固相反应烧结法制备 Nd₂BaCuO₅ (Nd211) 和 BaCuO₂ (011) 先驱粉体.具体过程如下:将 Nd₂O₃, BaCO₃ 和 CuO 粉体按摩尔比 1:1:1 称量混合均匀;在 920 °C 高温下烧结 24 h,经过三次烧结四次球磨,得到相纯的 Nd211 先驱粉体.同样地,将 CuO 按 1:1 的摩尔比称量混合均匀;在 910 °C 的高温下烧结 24 h,经过三次烧结和四次球磨,得到相纯的 BaCuO₂ 粉体.最后,压制 NdBCO 先驱样品,其由固相先驱块,液相先驱块和支撑块组成,并沿同轴轴线自上而下依次排列.将 MgO 单晶位于先驱样品中心,其诱导 NdBCO 完成晶体生长.具体而言,固相先驱块 (35 g, $d = 32$ mm) 由 [Nd211+0.2BaCuO₂+1% CeO₂+ x % MgO, ($x = 0, 4, 8, 12, 16, 20$)] 粉体混合组成,其中掺杂浓度单位是质量分数;液相先驱块 (49 g, $d = 40$ mm) 由 Y₂O₃, BaCuO₂, CuO 粉体按 1:10:6 摩尔比混合组成;支撑块 (8 g, $d = 40$ mm) 由 Y₂O₃ 粉末组成.在前驱体和 Al₂O₃ 板之间放置了几个 MgO 单晶,以防止样品受到污染.

将上述装配好的先驱样品放置在实验室自主研发的高温晶体生长炉中,经过相同的热处理程序,完成晶体生长.具体热处理过程如下:首先,从 30 °C 以 141.67 °C/h 的速率升高至 850 °C,并保温 10 h,此过程是排气以及熔融态液相形成的过程;随后,以 200 °C/h 的速率快速升温至 1150 °C,并保温 2 h,实现富 Ba, Cu 相上渗,并分解在升温过程中形成的 Nd123 相;然后,分别以 1 °C/h,

0.33 °C/h, 0.30 °C/h 速率分别降温至 1075 °C, 1065 °C, 1050 °C, 在籽晶的诱导下外延生长出 Nd123 相; 最后, 以 150 °C/h 速率快速降温至 30 °C, 完成晶体生长. 将完成晶体生长的所有先驱样品置于渗氧炉中, 历经 200 h 从 400 °C 缓慢降温至 300 °C, 在此过程中, 晶体由四方相转变为正交相, 从而具备了超导性能. 通过自然解理得到 NdBCO/MgO 籽晶.

2.2 “楼层式” YBCO 超导块材批量化制备

本文采用 SMG 法, 以“楼层式”结构实现 YBCO 超导块材的批量化制备. 在上述已有粉体基础上, 还需采购纯度为 99% 的 Y_2O_3 商用粉末. 首先, 通过固态反应烧结法制备 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) 和 Y_2BaCuO_5 (Y211) 两种先驱粉体, 式中 $0 \leq \delta \leq 1$. 具体过程如下: 将 Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO 按照 1:4:6 的摩尔比称量, 随后置于行星磨磨机中充分混合均匀; 与此同时, 另取 Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO , 按 1:1:1 的摩尔比进行称量, 同样用球磨机混合均匀. 把上述两种混合均匀后的粉体置 920 °C 的高温炉中烧结 24 h, 经过三次烧结和四次球磨的循环处理, 最终获得相纯度较高的 Y123 和 Y211 粉体. 然后, 将 Y123, Y211 按 1:0.4 的摩尔比称量, 混合, 再加入质量分数为 0.2% 的 CeO_2 . 将三种粉体在行星磨磨机中混合均匀后, 作为 SMG 生长法中的固相先驱粉体. 最后, 压制先驱样品, 其由 NdBCO/MgO 籽晶、直径 32 mm 和 6 mm 的 Yb_2O_3 支撑块 A 和 B、三个直径 32 mm 不同重量的固相先驱块 S1 (30 g), S2 (40 g), S3 (30 g) 组成. 为降低对自然解理 NdBCO/MgO 籽晶的要求, 对于只有一面 ab 面取向性好的籽晶, 将有缺陷的一面用固相先驱粉体包裹并压制成圆柱

体, 将没有缺陷的一面裸露在外面, 其高度与支撑块 B 相同. 上述压制好的先驱块, 其装配示意图如图 1 所示. 具体而言, 先驱样品由三层固相先驱块自下而上排列, 其中第一层由支撑块 A、固相先驱块 S1 自下而上同轴放置, 在 S1 上放置支撑块 B、固相包裹后的 NdBCO/MgO 籽晶, 如下图 1(a) 所示; 将固相先驱块 S2 放置在第一层上, 在 S2 上同样轴对称的放置支撑块 B, 固相包裹后的 NdBCO/MgO 籽晶; 最后, 将固相先驱块 S3 放置在顶部. 需要注意的是, 层之间放置的两个籽晶夹角几乎为 0°, 实现一个籽晶诱导两个先驱块生长, 提高籽晶的利用率. 在准备好的 Al_2O_3 垫片上放置多个相互间隔的 MgO 单晶块, 将装配好的先驱块放置在 MgO 单晶块上, 如图 1(b) 所示.

将上述装配好的先驱样品放入晶体生长炉中, 具体热处理程序如下: 以 120 °C/h 的升温速率升温至 900 °C, 保温 20 h; 以 60 °C/h 的升温速率升温至 1045 °C, 保温 2.5 h; 以 60 °C/h 的降温速率降温至 1006 °C, 以 0.3 °C/h 的速率慢冷至 986 °C, 随炉自然冷却至室温, 得到单畴 YBCO 块材. 随后, 将单畴 YBCO 块材置入石英管式炉中, 在流通氧气气氛中, 440—410 °C 的温区中慢冷 200 h, 得到单畴 YBCO 超导块材.

通过自然解理得到 NdBCO/MgO 小样, 将其研磨成粉末, 利用 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku D/max 2550X) 分析其物相组成; 采用差热分析方法 (DTA Q600 V8.0 Build 95) 研究不同 MgO 掺杂量对 NdBCO 相熔化温度的影响. 差热分析方法具体实验过程如下: 称取 20 mg 不同 MgO 掺杂量的 NdBCO 研磨粉末, 置于热分析仪中, 在大气气氛下以 $\alpha-Al_2O_3$ 为参照进行测试; 将样品从室温以一定速率升温至 1200 °C, 保温 10 min 后以相同

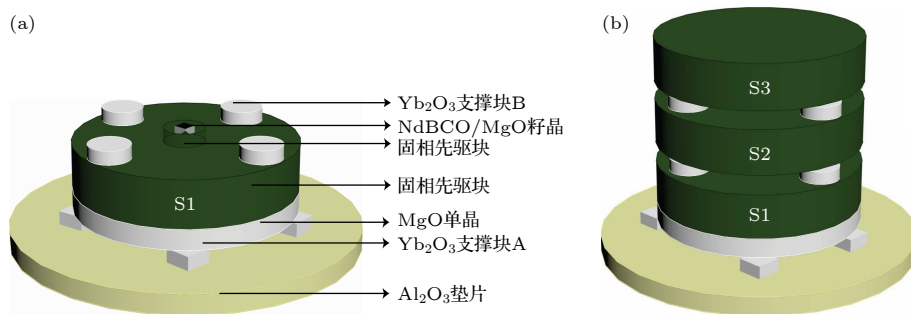


图 1 “楼层式”批量化制备 YBCO 先驱块装配示意图 (a) 底层装配示意图; (b) 三层装配示意图

Fig. 1. Schematic of the assembly for the stacked-architecture batch fabrication of YBCO precursor bulks: (a) Bottom assembly schematic diagram; (b) three-layer assembly schematic diagram.

速率冷却至室温, 并记录热分析数据. 采用扫描电子显微镜 (SEM, Nava Nano SEM 450) 观察 YBCO 超导块的微观形貌. 使用三维悬浮力与磁场分布测量系统^[31]测定 YBCO 超导块材的 F_L 与 B_{tr} . 其中, F_L 测试在 77 K 下进行, 采用直径 30 mm, 表面磁场 0.5 T 的 NdFeB 永磁体^[32]; B_{tr} 测试同样在 77 K 下开展, 使用电磁铁施加 0.5 T 的外加磁场对样品进行磁化.

3 实验结果与分析

采用 TSIG 方法制备了不同 MgO 掺杂量的 NdBCO 样品, 其宏观形貌如图 2 所示. 从图 2 可见, 所有样品表面均出现随机成核与凹陷现象, 未呈现出 REBCO 超导块材典型的单畴形貌 (如十字花纹). 该现象主要源于 NdBCO 晶体生长速率较快, 易于发生随机成核, 从而难以形成完整单畴结构. 尽管如此, 通过对上述样品自然解理, 仍可获得大量 NdBCO/MgO 籽晶, 可用于诱导生长 REBCO (RE = Y, Gd, Sm 等) 超导块材. 解理所

得籽晶具有良好的取向性和层状结构; 为降低对籽晶的整体要求, 我们选取其中仅单面 ab 面取向良好, 边界整齐的籽晶用于后续实验.

为了评估 MgO 掺杂量对 NdBCO 籽晶的影响, 采用 XRD 和 DTA 分别对籽晶的相组成和熔化温度进行了表征, 结果如图 3 和图 4 所示. XRD 衍射图谱表明, 所有样品的主要物相均为 $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (NdBCO, PDF#82-2289). 随着 MgO 掺杂量的增加, MgO (PDF#45-0946) 的主衍射峰强度逐渐增强. 然而, 在掺杂质量分数为 4% 的样品中, 未观察到明显的 MgO 衍射峰, 这可能是由于大部分 Mg^{2+} 进入到 NdBCO 晶格中^[33], 而剩余量低于 XRD 设备的检测限. 此外, 所有样品中 MgO 相的衍射峰强度均显著弱于 NdBCO 相, 该现象可能与 MgO 晶粒在基体中的取向分布或其相对含量较低有关. 另外, DTA 实验结果显示, 随着 MgO 掺杂量的增加, NdBCO 的熔点整体呈现先升高后降低的趋势, 最高熔点达到 1102.3 °C. 与未掺杂样品相比, 当掺杂质量分数为 16% 的 MgO 时, NdBCO 的熔点提升了 11.8 °C. 这一变化说明, 随着 MgO 掺杂量的增加, 进入 NdBCO 晶格中的 Mg^{2+} 逐渐增多, 从而有效提升了其熔点; 但当掺杂达到一定水平后, Mg^{2+} 的固溶逐渐趋于饱和, 强化效应不再进一步增强. 而当 MgO 掺杂质量分数进一步增大至 20% 时, 熔点出现下降, 这可能是由于过量的 MgO 在基体中形成第二相, 并可能诱发低熔点化合物的生成, 最终导致整体熔点的降低. 因此, 当掺杂质量分数为 16% 的 MgO 时, NdBCO 籽晶性能最佳.

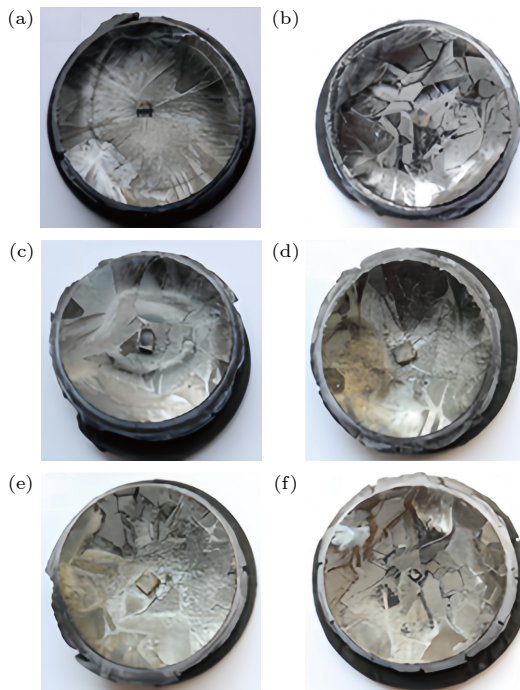


图 2 掺杂不同质量分数 MgO 的 NdBCO 超导块材表面宏观形貌图 (a) $x = 0\%$; (b) $x = 4\%$; (c) $x = 8\%$; (d) $x = 12\%$; (e) $x = 16\%$; (f) $x = 20\%$

Fig. 2. Top surface macrographs of NdBCO bulk superconductors with different content MgO additions: (a) $x = 0\%$; (b) $x = 4\%$; (c) $x = 8\%$; (d) $x = 12\%$; (e) $x = 16\%$; (f) $x = 20\%$.

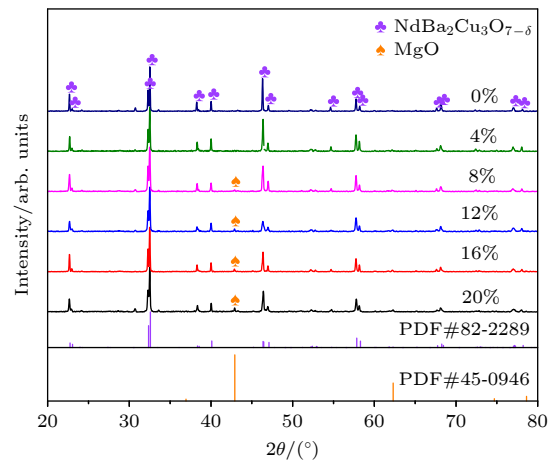


图 3 不同 MgO 掺杂量的 NdBCO 籽晶 XRD 图谱

Fig. 3. The XRD patterns of NdBCO seeds with different MgO doping amounts.

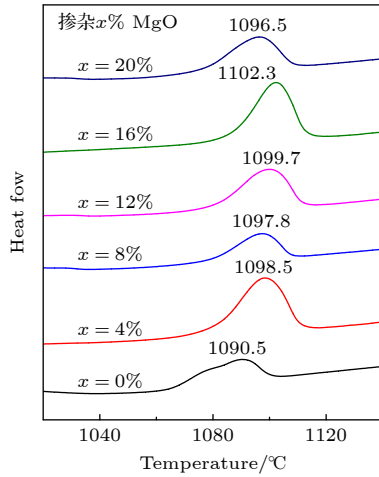


图 4 不同 MgO 掺杂量的 NdBCO 籽晶差热分析曲线图
Fig. 4. DTA curves of NdBCO seeds with different MgO doping levels.

通过自然解理自制 NdBCO/MgO 籽晶, 为降低对籽晶的要求, 将单面 ab 面取向性好的 NdBCO/MgO 籽晶用固相包裹, 并通过 SMG 方法以诱导 YBCO 超导块材的批量生产, 实验结果如图 5 所示. 图 5(a) 显示, 所有 YBCO 样品均呈现典型的单畴形貌, 表面可见清晰的十字花纹, 样品直径均为 28 mm. 这一结果进一步证实了 NdBCO/MgO 籽晶具有良好的热稳定性, 并成功实现了 YBCO 超导块材的“楼层式”批量制备, 如图 5(b) 所示. 此

外, 本研究通过 SMG 工艺实现了两项效率提升: 其一, 使用单一籽晶同时诱导两个超导块材生长, 显著地提高了籽晶利用率; 其二, 在相同生长期, 使一个超导块材由两个籽晶共同诱导生长, 不仅提升了生长效率, 也有助于制备更厚尺寸的样品, 如本文中的样品 S2.

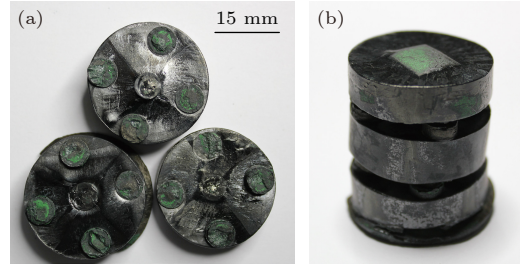


图 5 YBCO 超导块材形貌图 (a) 三层 YBCO 样品的表面形貌图; (b) “楼层式” YBCO 样品侧视图
Fig. 5. Morphology of YBCO bulk superconductors: (a) Surface morphology of the triple-layer YBCO sample; (b) side view of the “stacked architecture” YBCO sample.

将三层样品的底部与顶部分别自下而上命名为 S1-B, S1-T, S2-B, S2-T, S3-B 与 S3-T, 并采用三维磁力磁场测试仪测量其 B_{tr} 与 F_L , 结果如图 6—图 8 所示. 图 6 展示了单畴 YBCO 超导块材三维 B_{tr} 分布, 其中图 6(a)—(c) 为样品 S1—S3 顶部 B_{tr} 分布图, 图 6(a1)—(c1) 为样品底部 B_{tr} 分

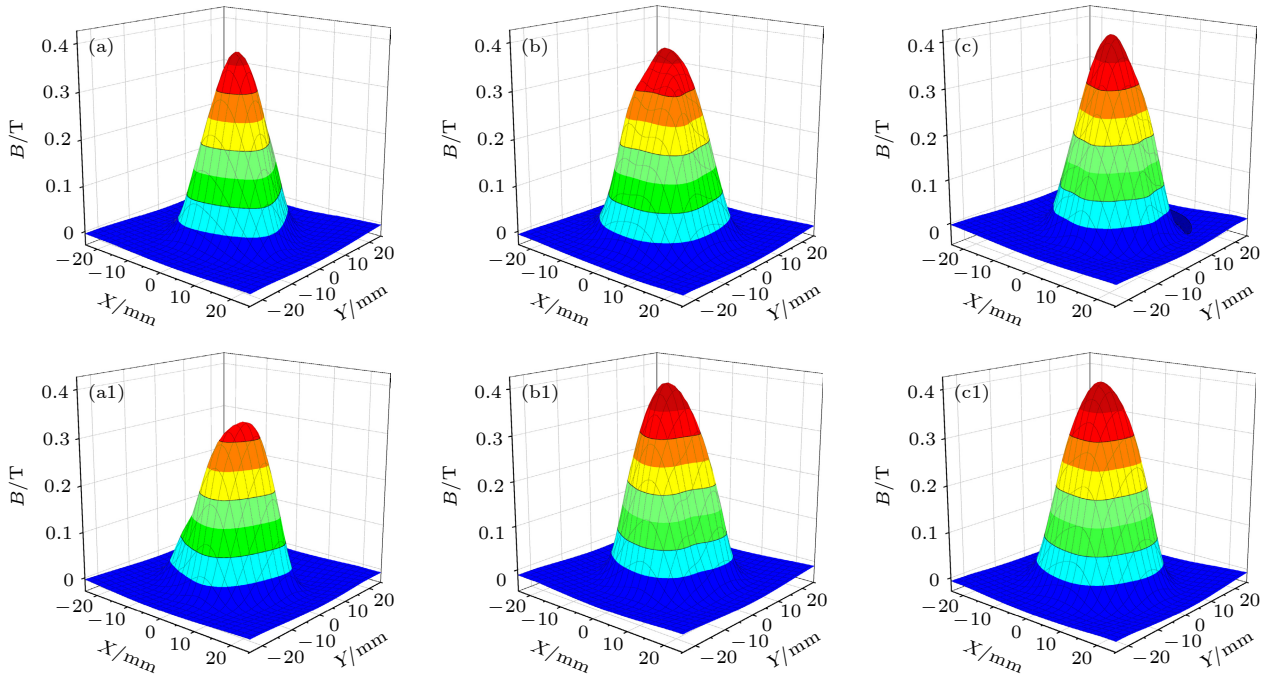


图 6 不同层 YBCO 超导块材的三维捕获磁场分布图 (a) S1-T; (a1) S1-B; (b) S2-T; (b1) S2-B; (c) S3-T; (c1) S3-B

Fig. 6. 3D trapped field distributions of the different YBCO bulk superconductor layers: (a) S1-T; (a1) S1-B; (b) S2-T; (b1) S2-B; (c) S3-T; (c1) S3-B.

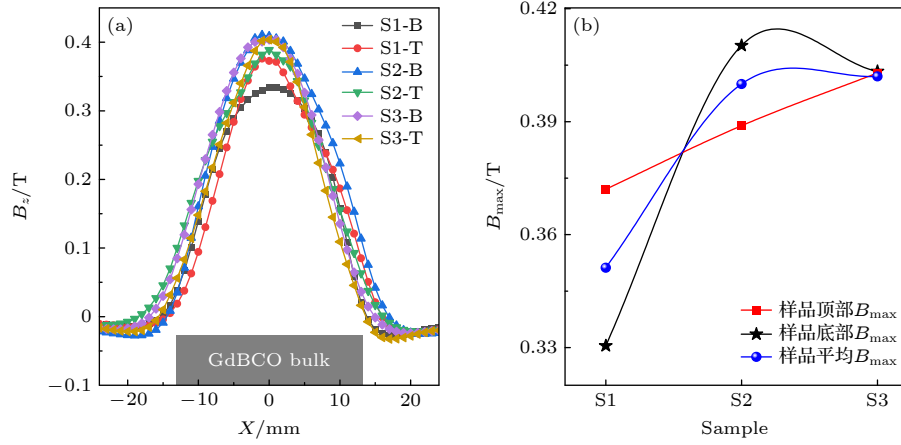


图 7 (a) 不同层 YBCO 超导块材沿径向捕获磁场分布图; (b) YBCO 超导块材捕获磁场剖面的 B_{mtr}

Fig. 7. (a) Trapped field distribution along the radial of the different YBCO bulk superconductor layers; (b) the B_{mtr} of the trapped field profile of the YBCO bulk superconductors.

布图. 结果显示所有样品的 B_{tr} 剖面均呈单峰形态, 且峰值位于样品中心, 表明各样品均具备良好的磁单畴特性. 为进一步量化分析, 沿样品径向提取了 Z 方向磁场分量 B_z , 如图 7(a) 所示; 结果进一步证明每个样品均为磁单畴. 样品捕获磁场最大值 (B_{mtr}) 结果如图 7(b) 所示, 结果说明, 一方面, 三层样品顶部 B_{max} 自下而上呈现线性递增趋势 (红色线); 三个样品底部 B_{max} 自下而上呈现先增大后减小趋势 (黑色线); 每层样品 B_{max} 的平均值自下而上呈现递增饱和趋势 (蓝色线). 另一方面, 结果反映出样品 S3 的 B_{tr} 分布最为均匀, 而样品 S1 的底部与顶部 B_{tr} 差异显著, 样品 S2 的均匀性介于

二者之间. 样品 S1, S2, S3 平均 B_{mtr} 分别为 0.35 T, 0.39 T 与 0.40 T. YBCO 超导块材的悬浮力 F_L 如图 8 所示, 其变化趋势与 B_{tr} 高度一致. 样品 S1, S2, S3 的平均最大 F_L 分别为 62.5 N, 73.2 N 与 75.5 N, 进一步说明 S3 均匀性最好、性能优, 而样品 S1 性能最弱. 值得注意的是, 样品 S2-B 的 B_{mtr} 与 F_L 均为最高, 分别达到 0.41 T 与 77.2 N, 但样品的平均性能略低于样品 S3. 综上所述, 采用“楼层式”批量制备方法所得的三层样品 (直径 28 mm), 其平均捕获磁场率超过 76%, 平均悬浮力高于 70 N. 该结果表明, 该方法在保证高性能的同时, 有效提升了超导块材的制备效率, 具备良好的可行性与应用潜力.

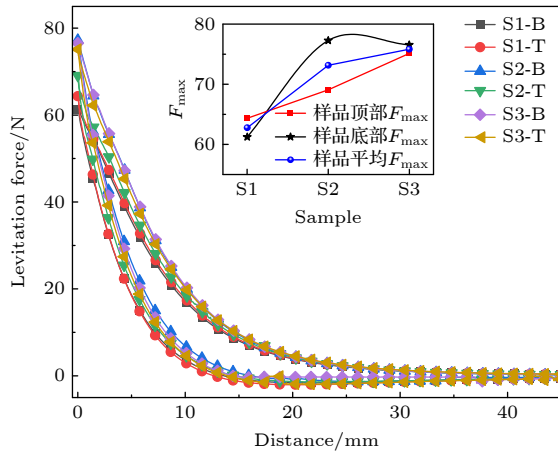


图 8 不同层 YBCO 超导块材与 NdFeB 永磁体间磁悬浮力随距离的变化 (插图为所测得的磁悬浮力最大值)

Fig. 8. Levitation force measured as a function of distance between different YBCO bulk superconductor layers and the permanent magnets. The inset shows the measured maximum levitation force.

对上述结果的深入分析发现, 尽管样品 S1 与 S3 厚度相同, 但 S3 的性能显著更优; 同时, 较厚的样品 S2 ($h = 9$ mm) 性能略优于 S3 ($h = 7.2$ mm), 而未展现出明显厚度优势. 为更深入地揭示样品间的性能差异, 本文通过 SEM 对样品的上下表面距籽晶 10 mm 处的微观形貌进行观测, 实验结果如图 9 所示. 其中, 图 9(a) 和图 9(a1) 分别为样品 S1 的上下表面形貌图; 图 9(b) 和图 9(b1) 对应的是样品 S2; 图 9(c) 和图 9(c1) 则对应样品 S3. 在所研究的样品中, 样品 S1 中 Y_2BaCuO_5 (Y211) 粒径相较于样品 S2 和 S3 明显偏大, 其平均粒径约 1.6 μm . 通过分析“楼层式”结构可知, 这一现象产生的原因是由于晶体在熔融生长过程中, 样品 S1 受到 S2 和 S3 的重力作用, 使得其大量液相流失至支撑块 A 中, 造成 Y211 粒子粗化. 另外, 由于 S1-B

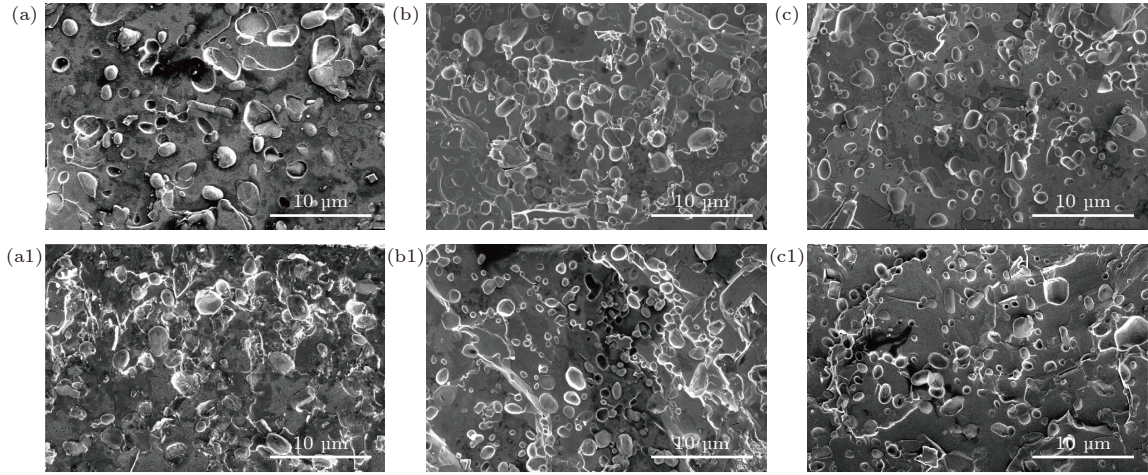


图 9 不同层 YBCO 超导块材 SEM 图 (a) S1-P; (a1) S1-B; (b) S2-P; (b1) S2-B; (c) S3-P; (c1) S3-B

Fig. 9. The SEM images of different YBCO bulk superconductor layers: (a) S1-P; (a1) S1-B; (b) S2-P; (b1) S2-B; (c) S3-P; (c1) S3-B.

与支撑块 A 直接接触, 其中混入了一些杂质, 如图 9(a1) 所示. 同样地, 样品 S2 在熔融态时, 其上表面液相所受重力大于浮力, 导致液相在样品内部分布不均: 下表面液相较为充沛, 而上表面则相对短缺. 图 9(b) 和图 9(b1) 显示, 样品 S2-T 中 Y211 平均粒径为 $1.3 \mu\text{m}$, 大于 S2-B 中的 ($1.1 \mu\text{m}$). 这是由于液相中 Ba 含量的增加, 降低了 Y211 与液相之间的界面能及 Gibbs-Thomson 系数, 从而减缓 Ostwald 熟化速率, 使 Y211 颗粒细化^[34]. 因此, S2-T 区域存在大量粗化的 Y211 颗粒. 相比之下, 样品 S3 的 Y211 颗粒在 S3-B 和 S3-T 中分布均匀且粒径相近, 其平均粒径约 $1.2 \mu\text{m}$. 这是由于该样品所受重力与浮力基本平衡, 液相分布均匀, 在籽晶诱导下实现了均匀的晶体生长. 这一系列对比清晰地表明, 样品性能的差异主要源于“楼层式”结构在制备过程中引起的液相分布不均.

本文进一步分析“楼层式”结构对样品磁通钉扎机制的影响. 对于非超导相 Y211 粒子, 磁通钉扎中心是指其与超导相形成的界面缺陷. 根据上述样品微观形貌的研究, Y211 粒子在数量和体积协同演化下, 导致每层样品中 Y211 粒子比表面积呈现不同的变化趋势. 三层样品顶部 Y211 粒子总比表面积自下而上呈现线性递增趋势, 如图 9(a)—(c) 所示. 三层样品底部 Y211 粒子总比表面积自下而上呈现递增又减小的趋势, S2-B 中 Y211 粒子总比表面积最大, 如图 9(a1)—(c1) 所示. 基于磁通钉扎理论^[35] 和 Dew-Hughes 模型^[36], 界面缺陷密度与磁通钉扎中心密度之间存在直接正相关关系, 故样品中磁通钉扎中心密度变化趋势与上述一致. 同

样地, 根据有效磁通钉扎中心密度与临界电流密度 J_c 的正相关性^[3], 可知 J_c 的变化趋势. 因此, “楼层式”结构所制备的样品 F_L , B_{tr} 性能如图 6—图 8 所示. 另外, 尽管 S1-B 中 Y211 粒子总比表面积比 S1-T 中大, 但在 S1-B 中存在杂质, 导致超导相减少, 如图 9(a1) 所示, 故 S1-T 性能更佳.

综上所述, “楼层式”结构可制备出性能优、效率高的超导块材. 但样品性能的均匀性有待提高, 下一步将通过构建样品中先驱粉体的液相浓度梯度分布, 优化该问题.

4 结 论

本研究通过工艺创新, 针对性改善了 YBCO 超导块材批量化制备中的成本与产能问题. 结果表明, 掺杂质量分数为 16% 的 MgO 可将 NdBCO 籽晶熔点从 1090.5°C 提升至 1102.3°C ; 经自然解理获得的复合籽晶实现自供给循环, 配合固相包裹技术大幅降低了对籽晶的严苛要求, 无需依赖商用籽晶, 显著地节约成本. 结合“楼层式”结构与 SMG 法, 高效利用炉体纵向空间, 较传统平行堆叠或分立生长模式, 大幅提升了空间利用率与籽晶使用效率. 所制备的三层直径 28 mm 样品, 样品的平均 B_{mtr} 介于 $0.35\text{—}0.40 \text{ T}$, 平均捕获磁场率超过 76%; 平均 F_{max} 介于 $62.5\text{—}75.5 \text{ N}$, 保持了优异的超导性能. SEM 微观分析揭示, 样品性能差异源于结构导致的液相分布不均, 而磁通钉扎理论与 Dew-Hughes 模型进一步印证了 Y211 粒子分布对性能的影响机制. 相较于已有批量化技术, 本研究在籽

晶自供给、能源利用效率等方面实现突破. 尽管如此, 样品性能均匀性仍有优化空间, 后续将通过构建先驱粉体液相浓度梯度分布持续完善工艺, 为 YBCO 超导块材的工业化落地提供更坚实的技术支撑.

参考文献

- [1] Durrell J H, Dennis A R, Jaroszynski J, Ainslie M D, Palmer K G B, Shi Y H, Campbell A M, Hull J, Strasik M, Hellstrom E E 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 082001
- [2] Yang P T, Yang W M, Zhang L J, Chen L 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 085005
- [3] Cui Y L, Yang W M 2024 *Supercond. Sci. Technol.* **37** 035002
- [4] Tomita M, Fukumoto Y, Suzuki K, Ishihara A, Muralidhar M 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 023912
- [5] Li H T, Deng Z G, Huang H, Liao H P, Yuan Y H, Zhang W H 2021 *IEEE. Trans. Appl. Supercond.* **31** 3602508
- [6] Ogata M, Matsue H, Yamashita T, Hasegawa H, Nagashima K, Maeda T, Matsuoka T, Mukoyama S, Shimizu H, Horiuchi S 2016 *Supercond. Sci. Technol.* **29** 054002
- [7] Li W H, Wang D X, Peng S S, Deng A G, Zhou D F, Cai C B 2024 *Cryogenics*. **140** 103849
- [8] Sotelo G G, Rodriguez E, Costa F S, Oliveira J G, Santiago J de, Stephan R M 2016 *Supercond. Sci. Technol.* **29** 095016
- [9] Tomita M, Murakami M 2003 *Nature* **421** 517
- [10] Lelekhov S A, Krasil'nikov A V, Kuteev B V, Kovalev I A, Ivanov D P, Ryazanov A I, Surin M I, Shavkin S V, Vysotsky V S, Potanina L V 2018 *IEEE. Trans. Appl. Supercond.* **28** 4200305
- [11] Cai C B, Fujimoto H 2000 *J. Mater. Res.* **15** 1742
- [12] Tang C Y, Yao X, Shi A B, Shen W Z, Rao Q L 2006 *Physica C* **445–448** 299
- [13] Yao X, Hu J, Izumi T, Shiohara Y 2004 *J. Phys: Condens. Matter*. **16** 3819
- [14] Sun L J, Tang C Y, Yao X, Jiang Y 2007 *Physica C* **460–462** 1339
- [15] Muralidhar M, Suzuki K, Fukumoto Y, Ishihara A, Tomita M 2011 *IEEE. Trans. Appl. Supercond.* **21** 2702
- [16] Bierlich J, Habisreuther T, Litzkendorf D, Dubs C, Müller R, Kracunovska S, Gawalek W 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** S194
- [17] Wu X D, Xu K X, Pan P J 2009 *Physica C* **469** 1906
- [18] Hari Babu N, Shi Y H, Iida K, Cardwell D A 2005 *Nat. Mater.* **4** 476
- [19] Shi Y H, Hari Babu N, Cardwell D A 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** L13
- [20] Namburi D K, Shi Y H, Dennis A R, Durrell J H, Cardwell D A 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 044003
- [21] Muralidhar M, Suzuki K, Fukumoto Y, Ishihara A, Tomita M 2013 *Physica C* **484** 108
- [22] Muralidhar M, Tomita M, Suzuki K, Fukumoto Y 2010 *Physica C* **470** 20
- [23] Gawalek W, Habisreuther T, Zeisberger M, Litzkendorf D, Surzhenko O, Kracunovska S, Prikhna T A, Oswald B, Kovalev L K, Canders W 2004 *Supercond. Sci. Technol.* **17** 1185
- [24] Shi Y, Babu N H, Iida K, Yeoh W K, Dennis A R, Pathak S K, Cardwell D A, 2010 *Physica C* **470** 685
- [25] Ren H T, Xiao L, Jiao Y L, Zheng M H 2004 *Physica C* **412–414** 597
- [26] Yu D J, Cheng L, Peng B N, Chen Y Y, Ikuta H 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 203914
- [27] Wang M, Yang W M, Yang P T, Feng Z L, Li J W, Wang M Z, Zhang L J 2014 *Sci. Sin. -Phys. Mech. Astron.* **44** 907 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 杨芃焘, 冯忠岭, 李佳伟, 王明梓, 张龙娟 2014 中国科学: 物理学 力学 天文学 **44** 907]
- [28] Wang M, Yang W M, Wang X M, Zan Y T, Chen S L, Zhang M, Hu C X 2021 *Acta. Phys. Sin.* **70** 158101 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 王小梅, 咎雅婷, 陈森林, 张明, 胡成西 2021 物理学报 **70** 158101]
- [29] Li G Z, Wang M 2024 *Acta. Phys. Sin.* **73** 197402 (in Chinese) [李国政, 王妙 2024 物理学报 **73** 197402]
- [30] Li J W, Yang W M, Chen S L, Wang M, Feng Z L 2015 *Sci. Sin. -Phys. Mech. As.* **45** 027001 (in Chinese) [李佳伟, 杨万民, 陈森林, 王妙, 冯忠岭 2015 中国科学: 物理学 力学 天文学 **45** 027001]
- [31] Yang W M, Chao X X, Shu Z B, Zhu S H, Wu X L, Bian X B, Liu P 2006 *Physica C* **445–448** 347
- [32] Cui Y L, Yang W M, Wu T T, Abulizi A, Wang M 2022 *Ceram. Int.* **48** 20872
- [33] Xu X Y, Lu Y F, Feng J Q, Zhang C, Xiong X M, Liu G Q, Yu Z M 2010 *Rare Met. Mater. Eng.* **39** 1781 (in Chinese) [徐晓燕, 卢亚锋, 冯建情, 张翠萍, 熊晓梅, 刘国庆, 于泽铭 2010 稀有金属材料与工程 **39** 1781]
- [34] Bieger W, Krabbes G, Schätzle P, Zelenina L, Wiesner U, Verges P, Klosowski J 1996 *Physica C* **257** 46
- [35] Blatter G B, Feigelman M V, Geshkenbein V B, Larkin A I, Vinokur V M 1994 *Rev. Mod. Phys.* **66** 1125
- [36] Dew-Hughes D 1974 *Philos. Mag.* **30** 293

Batch fabrication of YBCO bulk superconductors via a stacked architecture using NdBCO/MgO seeds^{*}

CUI Yanlan¹⁾³⁾ WU Tingting²⁾³⁾ LIU Yuguang³⁾ YANG Wanmin^{3)†}

1) (*Institute of Solid State Physics and College of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China*)

2) (*Basic Teaching Department, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Taiyuan 030619, China*)

3) (*College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

(Received 26 January 2026; revised manuscript received 8 March 2026)

Abstract

REBCO high-temperature bulk superconductors demonstrate exceptional performance but face industrialization barriers due to high manufacturing costs. Current batch production methods require optimization in terms of production capacity and cost-effectiveness. This study focuses on process innovation to reduce costs and enhance efficiency in REBCO industrialization. NdBCO/MgO seeds are prepared by the top-seed melt infiltration growth (TSIG) method, with a systematic investigation the doping effects of MgO within the $[\text{Nd}_{211}+0.2\text{BaCuO}_2+1\%\text{CeO}_2+x\%\text{MgO}]$ system. The results identified an optimal MgO doping content of 16%, which effectively increased the seed melting point by 11.8 °C to 1102.3 °C. Through natural cleavage, high-melting-point NdBCO/MgO seeds were obtained. By integrating the seeded melt growth (SMG) technique with the innovative “stacked architecture” design, efficient batch production of YBCO superconductors is achieved. Additionally, the solid-phase seed wrapping technique is implemented to relax the stringent requirements for seeds, enabling more flexible processing conditions. Performance characterization of YBCO samples show that for triple-layer samples (28 mm diameter, S1/S2/S3) prepared by the stacked architecture, the average maximum trapped magnetic field (B_{mtr}) values are 0.35 T, 0.39 T, and 0.40 T, respectively, with an average trapped field ratio exceeding 76%; the average maximum levitation forces (F_{max}) are 62.5 N, 73.2 N, and 75.5 N. Scanning electron microscopy (SEM) is used to observe the microstructure and elucidate the influence mechanism of the “stacked architecture” on sample performance. In conclusion, the innovative stacked architecture for batch fabrication of YBCO bulk superconductors significantly improves production efficiency while maintaining excellent performance.

Keywords: NdBCO/MgO composite seed, layered superstructure batch fabrication architecture, YBCO bulk superconductor, trapped field, levitation force

DOI: [10.7498/aps.75.20260143](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260143)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260143](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260143)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52072229), the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education of China (Grant No. 311033), the Fundamental Research Program of Shanxi Province of China (Grant Nos. 202503021212240, 202203021222326), the Science and Technology Innovation Project of Shanxi Colleges and Universities, China (Grant No. 2024L318).

[†] Corresponding author. E-mail: yangwm@smu.edu.cn



采用NdBCO/MgO籽晶的楼层式批量化制备YBCO超导块材

崔艳兰 武婷婷 刘玉光 杨万民

Batch fabrication of YBCO bulk superconductors via a stacked architecture using NdBCO/MgO seeds

CUI Yanlan WU Tingting LIU Yuguang YANG Wanmin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 120704 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260143

CSTR: 32037.14.aps.75.20260143

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260143>

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

纳米CeO₂掺杂的YBCO超导块材的制备及其性能

Fabrication and properties of nano-CeO₂ doped Y-Ba-Cu-O bulk superconductors

物理学报. 2024, 73(19): 197402 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240832>

基于质子辐照YBCO超导带材临界电流提升技术研究

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

物理学报. 2026, 75(1): 197402 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251031>

超导转子磁悬浮结构磁耦合特性及承载能力分析

Analysis on magnetic coupling characteristics and carrying capacity of superconducting rotor magnetic levitation structure

物理学报. 2023, 72(12): 128401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230328>

用于射频传输线制备的YBCO薄膜工艺开发与特性研究

Process development and characteristics of YBCO thin film for radio frequency transmission wire preparation

物理学报. 2025, 74(5): 057401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241583>

磁悬浮系统中多芯复合Nb₃Sn超导线磁通跳跃的可调性研究

Tunable flux-jump characteristic of multifilamentary composite Nb₃Sn superconducting wires in maglev systems

物理学报. 2023, 72(1): 017401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221252>

Cu/MgO/MoS₂/Cu结构的电阻开关特性

Resistive switching characteristics of Cu/MgO/MoS₂/Cu structure

物理学报. 2025, 74(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241298>