

纳米 CeO₂ 掺杂的 YBCO 超导块材的制备及其性能*李国政^{1)†} 王妙²⁾

1) (天津师范大学物理与材料科学学院, 天津 300387)

2) (西安航空学院理学院, 西安 710077)

(2024 年 6 月 14 日收到; 2024 年 9 月 2 日收到修改稿)

本文采用两种熔渗生长工艺 (011-IG 和 211-IG) 制备纳米 CeO₂ 掺杂的 Y-Ba-Cu-O (YBCO) 超导块材, 同时使用一种坑式籽晶模式来阻止薄膜籽晶在热处理过程中的移动, 随后对样品的生长形貌、微观结构和超导性能进行研究. 结果表明, 在低掺杂量 (质量分数为 1%) 下, YBCO 晶体的正常生长不会受到影响, 用两种工艺均能成功制备生长完全的单畴 YBCO 超导块材, 且籽晶的位置没有发生任何移动, 证明了新籽晶模式的有效性. 扫描电子显微镜结果表明, 纳米 CeO₂ 掺杂可以有效细化超导块材内 Y₂BaCuO₅ (Y-211) 微米级粒子的尺寸, 且该方法对两种工艺均有效. 低温磁性测试结果表明, 011-IG 法制备的纳米 CeO₂ 掺杂的样品在低外场下呈现出比未掺杂样品明显优越的 J_c 性能, 说明细化的 Y-211 粒子可以有效地提高 δl 型钉扎. 此外, 相比 211-IG 法制备的样品, 011-IG 法制备的样品在磁悬浮力、微观形貌和 J_c 性能等方面表现更优越, 因此 011-IG 法是一种更有潜力的制备工艺. 本文结果对进一步提高 YBCO 超导块材的性能和优化制备工艺有重要意义.

关键词: 单畴 Y-Ba-Cu-O, 熔渗生长, 纳米 CeO₂ 掺杂, 超导性能

PACS: 74.62.Dh, 74.72.-h, 74.25.-q

DOI: 10.7498/aps.73.20240832

CSTR: 32037.14.aps.73.20240832

1 引言

利用顶部籽晶技术引导生长的单畴 RE-Ba-Cu-O (REBCO, RE 为稀土元素, 如 Nd, Sm, Eu, Gd 和 Y 等) 高温超导块材能在液氮温区承载更高的超导电流, 具有良好的自稳定磁悬浮和捕获磁通能力, 在超导强磁体、超导电机/发电机和超导磁悬浮领域具有广阔的应用前景^[1-4]. 与顶部籽晶技术相组合的熔化生长 (MG) 工艺和熔渗生长 (IG) 工艺是制备单畴 REBCO 超导块材的两种主要方法.

IG 工艺近些年在国际上受到了越来越多的关注, 因为可以有效地解决 MG 工艺中出现的各种问题, 比如样品严重收缩变形、液相流失、内部大

孔洞、RE₂BaCuO₅ (RE-211) 第二相粒子在 REBa₂Cu₃O_{7- δ} (RE-123) 超导基体中分布严重偏析等. IG 工艺需要用到两个前驱块, 一个是 RE-211 固相块, 另一个是富 Ba、Cu 的液相块, 早期组分通常为 RE-123+Ba₃Cu₅O₈ (035, 一种名义组分, 实际为 3BaCuO₂+2CuO 的混合物), 后经我们改进为 RE₂O₃+10BaCuO₂+6CuO^[5], 使得工艺所需的前驱粉种类降为两种 (即 RE-211 和 BaCuO₂), 从而简化了工艺, 提高了制备效率. 后续为了进一步简化工艺, Yang 研究组使用 RE₂O₃+BaCuO₂ 的混合物取代 RE-211 作为新固相源, 成功制备了单畴 REBCO 超导块^[6]、超导环^[7]、超导管^[8] 以及带有人工钻孔的超导块^[9] 等. 这种新的 IG 工艺仅需使用 BaCuO₂ (011) 一种前驱粉, 工艺得到极大简化,

* 国家自然科学基金 (批准号: 51872199) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ligz1984@126.com

我们将其称为 011-IG 法, 而原来基于 RE-211 固相块的 IG 工艺被称为 211-IG 法, 以作区别. 此外, 011-IG 法制备的样品内会原位产生很多的纳米级内含粒子, 充当了更有效的磁通钉扎中心, 从而获得更高的超导性能^[10], 但是其机制目前仍不明确. 利用微量 CeO_2 掺杂 (通常质量分数为 1%) 细化基体内 RE-211 粒子尺寸的手段在 011-IG 工艺中仍是有效的^[11]. 在 $\text{RE}_2\text{O}_3+\text{BaCuO}_2$ 的固相块中使用纳米级的 RE_2O_3 同样可以获得实验的成功^[12].

在我们最近的研究中, 新型的 NdBCO/YBCO/MgO 薄膜籽晶被引入到 011-IG 工艺中^[13], 然后采用了基于新型开瓣模具的坯块成型方法^[14]和新型固体源成分 $\text{RE}_2\text{O}_3+1.15\text{BaCuO}_2+0.1\text{CuO}$ ^[15] (对应 $\text{RE}_2\text{O}_3+\text{BaCuO}_2+0.05\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$, 即富 $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ 组分) 以消除样品表面的宏观裂纹和降低样品内的气孔率, 有效提高了超导块材的磁悬浮性能, 在直径 17.5 mm 的 Y-Ba-Cu-O (YBCO) 单畴样品上测得 57.84 N 的高悬浮力性能. 在此基础上, 本文尝试将纳米级 CeO_2 掺杂到 YBCO 超导体内, 以细化超导体内捕获的 Y-211 粒子的尺寸、改善微观结构. 已有研究表明, 对于同一掺杂物, 纳米级粉体的掺杂通常会比常规微米级粉体掺杂起到更显著的作用^[16,17]. 此外, 由于薄膜籽晶非常轻薄且膜面光滑, 在热处理时其位置经常发生移动, 有时甚至移动到样品边缘, 这给实验带来了很大的不确定性, 因此本文会采用一些新手段来解决这个问题.

由于 011-IG 工艺更简化且制备的样品性能更高, 目前我们实验室已用 011-IG 法全面取代了传统的 211-IG 法, 但在国际其他科研人员内 211-IG 工艺仍非常流行, 因此本文也同步使用 211-IG 法制备了纳米 CeO_2 掺杂的 YBCO 超导块材, 并与 011-IG 法制备的样品进行了对比.

2 实验

本研究使用的原料为 Y_2O_3 (99.999%, Alfa), BaCO_3 (99%, Alfa), CuO (99.7%, Alfa), Yb_2O_3 (99.9%, Alfa) 和纳米 CeO_2 (15—30 nm, 99.5%, Alfa) 粉末. 图 1 展示了 CeO_2 纳米粉体的扫描电子显微镜 (SEM) 图像. Y-211 和 BaCuO_2 前驱粉用固相反应法合成, 即通过多次高温烧结和球磨的方式制备, 具体方法可见前期工作^[13]. 根据固

相源 (分别为 011-IG 和 211-IG) 和液相源的组分: $\text{Y}_2\text{O}_3+1.15\text{BaCuO}_2+0.1\text{CuO}+1\text{wt.}\%$ 纳米 CeO_2 , $\text{Y-211}+1\text{wt.}\%$ 纳米 CeO_2 和 $\text{Y}_2\text{O}_3+10\text{BaCuO}_2+6\text{CuO}$ (1wt.% 表示质量分数为 1%), 称量并充分混合粉末. 由于 RE-211 固相块是 211-IG 方法的基本特征, 因此我们没有在 211-IG 工艺的固体块中采用富 $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ 组分.

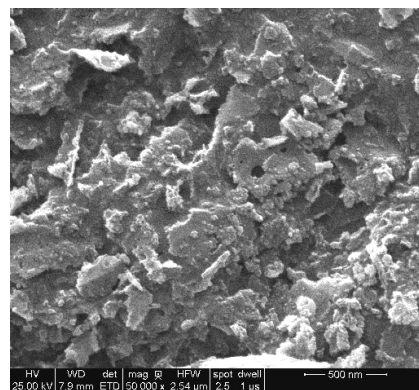


图 1 CeO_2 纳米粉体的 SEM 图像
Fig. 1. SEM image of the CeO_2 nanopowder.

然后, 使用新型开瓣模具 ($\phi 16$ mm) 将固相粉压制成固相块^[14], 并使用一种新的顶部籽晶模式来阻止加热过程中薄膜籽晶的移动. 首先, 在一个不锈钢垫片 ($\phi 16$ mm) 的中心位置粘贴一个表面粗糙的薄塑料片. 准备了两种类型的片材: 一种为边长 4 mm、厚度 0.4 mm 的正方形, 另一种为直径 4 mm、厚度 0.4 mm 的圆形. 使用这种不锈钢垫片压制固相块, 可在坯块顶部的中心位置制造一个底面粗糙的小凹坑, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 液相块和 Yb_2O_3 支撑块也使用开瓣模具 ($\phi 26$ mm) 压制. 前驱块和 NdBCO/YBCO/MgO 薄膜 (由德国 Ceraco Ceramic Coating GmbH 公司提供) 的装配方式如图 2(c) 所示. 用于熔渗生长 YBCO 单畴样品的热处理方式如图 2(d) 所示.

热处理后, 首先用数码相机拍摄 YBCO 样品生长后的表面形貌, 并在样品顶面进行 X 射线衍射 (XRD) 测试以判断样品的 c 轴取向性, 然后将样品在流动氧气中 450—400 °C 的温区内退火约 200 h, 从而获得 YBCO 高温超导体. 利用自制的三维磁力与磁场测试装置^[18] 在液氮温度下测试样品的磁悬浮力性能, 其中使用的永磁体为 $\phi 18$ mm、表面磁场 0.5 T. 为了进行微观结构表征, 从大块样品的顶面边缘位置切割下尺寸约为 1.5 mm×1 mm×1 mm 的小试样, 然后沿着 ab 面解理, 对

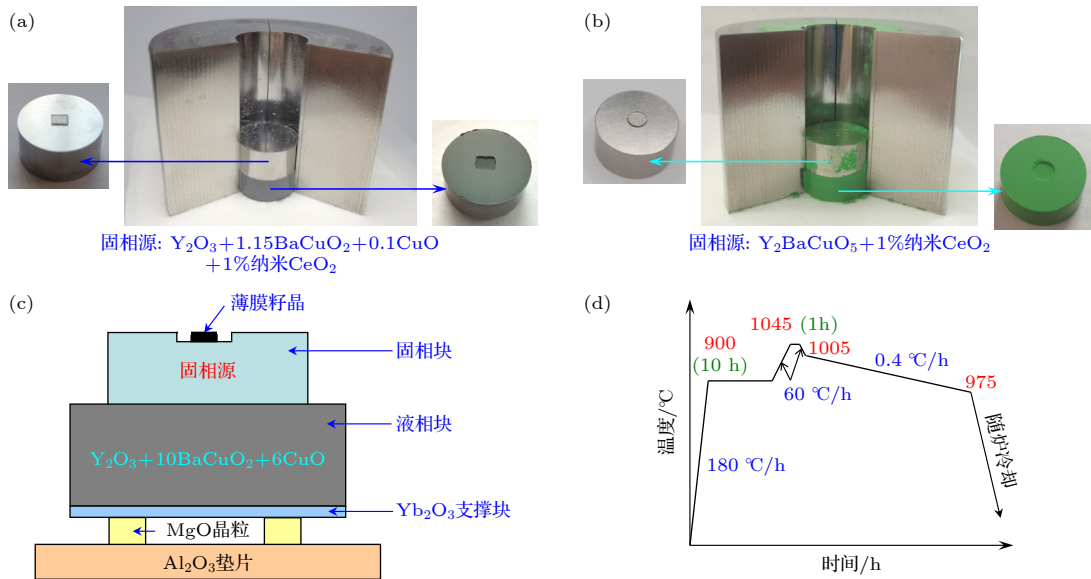


图 2 (a), (b) 带有顶部方坑或圆坑的固相块的压制方法; (c) 前驱块和薄膜籽晶的装配方法示意图; (d) 用于熔渗生长 YBCO 单畴样品的热处理方式

Fig. 2. (a), (b) Methods for pressing the preforms with the top square pit or round pit; (c) schematic illustration showing the configuration method of the precursor pellets and the film seed; (d) the heat treatment profile used for the IG process of the YBCO single-domain samples.

获得的解理面进行 SEM 测试. 为了表征局部超导电性 (转变温度 T_c 和临界电流密度 J_c), 从块体顶面距离块体边缘 1 mm 的位置处切割下尺寸约为 $1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的小试样, 然后使用振动样品磁强计 (VSM) 测量其 $M-T$ 曲线和 $M-H$ 磁滞回线, 具体流程可见前期工作 [15]. 最后使用扩展的 Bean 临界态模型由 $M-H$ 回线计算 $J_c(\text{A}/\text{cm}^2)$ 结果 [19].

3 结果与讨论

图 3 展示了分别由 011-IG 和 211-IG 工艺制备的掺杂纳米 CeO_2 的 YBCO 样品的表面形貌. 从图 3 可以看出, 由于籽晶被放在具有粗糙底面的凹坑内, 两个样品都没有发生籽晶移动的现象, 从而可以确保 YBCO 晶体从中心薄膜籽晶处外延生长, 最终整个固相块完全生长为一个晶粒. 该结果证明了新籽晶模式的优越性和稳定性, 并且仅需一个很小的操作就能达到这种效果, 即在不锈钢垫片上先粘上一个塑料片, 而且只需粘一次, 以后可重复使用. 此外, 两个样品都生长成功, 没有出现单畴区没长满 (对应 Y-123 生长速率下降) 或出现其他随机成核的现象, 这表明少量的纳米 CeO_2 掺杂不会影响 YBCO 晶体的正常生长. 对于最终样品的尺寸, 011-IG 法生长的样品直径约为

17.5 mm, 与之前报道的无纳米 CeO_2 掺杂的样品的直径相同 [15]. 211-IG 法制备的样品展示出相对较大的尺寸, 直径约为 17.8 mm, 这是可以理解的. 因为本文 011-IG 工艺中使用的是富 $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ 组分的固相块. 在升温阶段, 固相块中的 $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ 会发生粉末熔化现象, 从而给坯块带来收缩效应, 会部分抵消最后样品的膨胀效应, 所以最终获得一个较小的尺寸. 但相对于前驱固相块的尺寸 ($\phi 16\text{ mm}$), 最终样品的尺寸实际上都是膨胀的, 且膨胀率约为 10%.

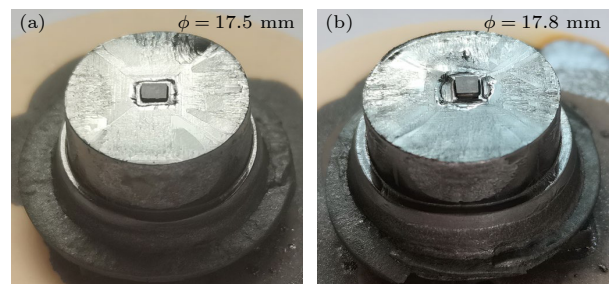


图 3 由 (a) 011-IG 和 (b) 211-IG 工艺制备的掺杂纳米 CeO_2 的 YBCO 样品的表面形貌

Fig. 3. Surface morphology of the nano- CeO_2 doped YBCO samples fabricated by the (a) 011-IG and (b) 211-IG techniques respectively.

图 4 展示了分别由 011-IG 和 211-IG 工艺制备的掺杂纳米 CeO_2 的 YBCO 样品顶面的 XRD

图谱. 由图 4 可见, 两个样品都只展示出了 (00*l*) 系列衍射峰, 这表明样品具有良好的 *c* 轴取向性, 在应用于超导磁悬浮和高场磁体方面时能呈现更高的性能. 该结果与样品顶面展示的生长形貌特征是一致的. 由图 3 可见, 两个样品顶面的生长扇区边界都是相互垂直的, 只有严格 *c* 轴取向的样品才会呈现这种“十”字花纹图样 [13]. 这些结果都证明了样品的高生长品质.

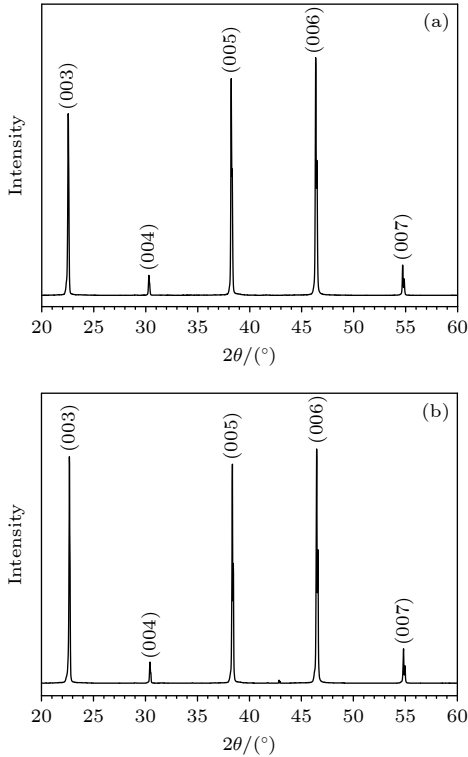


图 4 由 (a) 011-IG 和 (b) 211-IG 工艺制备的掺杂纳米 CeO₂ 的 YBCO 样品顶面的 XRD 图谱

Fig. 4. XRD patterns measured on the top surface of the nano-CeO₂ doped YBCO samples fabricated by the (a) 011-IG and (b) 211-IG techniques respectively.

图 5 展示了纳米 CeO₂ 掺杂的 YBCO 超导块材在液氮温度下的悬浮力性能. 由图 5 可见, 用 011-IG 法制备的纳米 CeO₂ 掺杂的样品在与永磁体的最小距离处呈现的最大悬浮力 (F_{\max}) 达到 58.28 N, 略高于用相同工艺参数制备的无纳米 CeO₂ 掺杂的样品 (57.84 N)^[15]. 用 211-IG 法制备的纳米 CeO₂ 掺杂的样品呈现出 50.37 N 的 F_{\max} , 虽然比 011-IG 法制备的样品性能低了一些, 但该值是迄今为止我们实验室用 211-IG 法制备的、16 mm 模具压制的 YBCO 超导块材的最高悬浮力性能, 甚至高于前期工作中用 20 mm 普通模具压制的更大尺寸的样品. 比如在 211-IG 法中进行的 Bi₂O₃^[20],

Y₂Ba₄CuNbO_y^[21] 和 Y₂Ba₄CuBiO_y^[22] 在 YBCO 超导块材内的掺杂研究中, 就算在最佳掺杂量下样品的 F_{\max} 也仅分别为 25 N, 20.9 N 和 27.2 N, 约为本文 211-IG 法样品 F_{\max} 的一半左右. 这说明我们在 011-IG 法中发展出来的新手段在 211-IG 法中同样能发挥很好的作用, 即用高质量超导薄膜作籽晶来保证最终样品的高生长品质, 用新型开瓣模具压制前驱块来抑制样品表面出现宏观裂纹, 以及本文中使用的纳米 CeO₂ 掺杂. 该结果对仍在使用 211-IG 工艺的其他科研小组有重要的参考价值. 此外, 尽管 211-IG 法样品的性能已经很优越, 但 011-IG 法样品的性能明显更高, F_{\max} 提高了约 16%, 这再次证明了 011-IG 工艺的优越性. 从长远看, 011-IG 法有很大趋势会完全取代 211-IG 法.

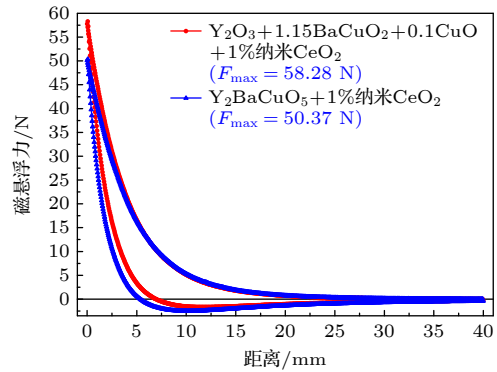


图 5 纳米 CeO₂ 掺杂的 YBCO 超导块材在液氮温度下的悬浮力性能

Fig. 5. Levitation force property of the nano-CeO₂ doped YBCO bulk superconductors at the liquid-nitrogen temperature.

图 6 展示了分别用 011-IG 法和 211-IG 法制备的纳米 CeO₂ 掺杂的 YBCO 样品的 SEM 结果, 为了便于对比, 同时给出了 011-IG 法制备的未掺杂样品的微观形貌^[15]. 由图 6 可见, 对于未掺杂纳米 CeO₂ 的样品 (图 6(a)), 超导基体内捕获的 Y-211 第二相粒子的尺寸相对更大, 其中最大粒子的尺寸达到约 3 μm. 而对于质量分数为 1% 纳米 CeO₂ 掺杂的样品 (图 6(b) 和图 6(c)), Y-211 粒子的尺寸明显变小, 最大粒子的尺寸已减小至约 2 μm, 这证明纳米 CeO₂ 掺杂可以有效细化超导块材内 Y-211 微米级粒子的尺寸, 且该方法对 011-IG 和 211-IG 工艺均有效. 此外, 在两个 011-IG 法制备的样品内都发现了弥散的纳米级粒子 (图 6(a) 和图 6(b)), 其形成机制目前仍不明确. 对于 211-IG 法制备的样品 (图 6(c)), 我们也可以看到一些

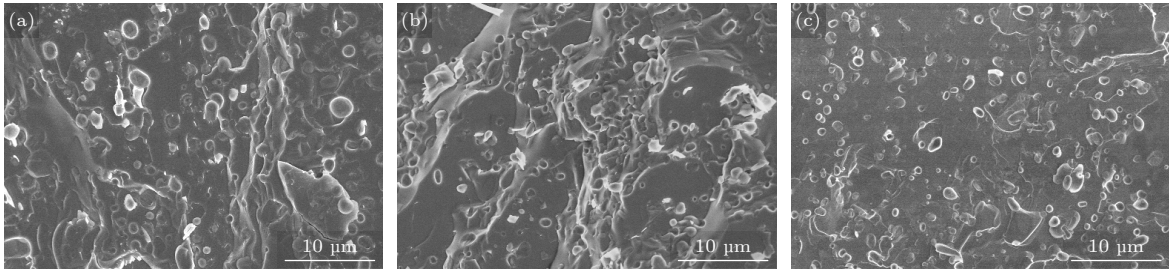


图 6 (a) 011-IG 法制备的未掺杂样品, (b) 011-IG 法制备的纳米 CeO_2 掺杂的样品和 (c) 211-IG 法制备的纳米 CeO_2 掺杂的样品的 SEM 结果

Fig. 6. SEM result of the (a) 011-IG-processed sample without dopant, (b) 011-IG-processed, nano- CeO_2 doped sample and (c) 211-IG-processed, nano- CeO_2 doped sample.

纳米尺寸的颗粒, 它们代表着最小的 Y-211 粒子, 实际上呈现了 Y-211 粒子在液相中溶解消失前的状态, 但它们的数量极其有限. 微观结构中捕获的纳米级粒子可以充当更有效的磁通钉扎中心, 从而提高材料的超导性能, 这应该是 011-IG 法制备的样品性能更高的主要原因.

图 7 展示了纳米 CeO_2 掺杂的 YBCO 样品的 T_c 性能, 为了直观地对比我们同样给出了未掺杂样品的数据 [15]. 由图 7 可见, 掺杂和未掺杂纳米 CeO_2 的两个 011-IG 法制备的样品表现出非常相似的超导转变行为, 这说明少量的纳米 CeO_2 掺杂不会破坏样品的超导电性. 而对于 211-IG 法制备的纳米 CeO_2 掺杂的样品, 其 T_c 略有降低, 转变宽度 (ΔT_c) 也略有展宽. 我们在前期工作中发现, 用富 $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ 的固相源制备的样品具有略高的 T_c 性能, 因为 $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ 的粉末熔化收缩效应会使最终样品具有更小的直径、更高的致密度和更低的气孔率 [15], 这是有利于 T_c 性能的 [23]. 图 7 中两个 011-IG 法制备的样品都使用了富 $\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_8$ 的固相块, 它们呈现出略优的 T_c 性能是可以理解的.

图 8 展示了三个 YBCO 样品在 77 K 下的 J_c 性能. 由图 8 可见, 两个 011-IG 法制备的样品在大于 1.6 T 的外场下 J_c 性能基本一样, 但在小于 1.6 T 的外场下纳米 CeO_2 掺杂的样品呈现出明显优越的 J_c 性能, 这与其微观结构中观察到的结果是相符的. 纳米 CeO_2 掺杂所带来的微米级 Y-211 粒子的细化可以改善 Y-123/Y-211 的界面钉扎, 即 δl 型钉扎, 它主要在低场下发挥作用 [24]. 对于 211-IG 法制备的纳米 CeO_2 掺杂的样品, 其 J_c 性能要低很多, 这与前面在磁悬浮力、微观结构和转变温度中观察的结果是相符的, 同时再次证明 011-IG 法是一种更为优越的制备工艺.

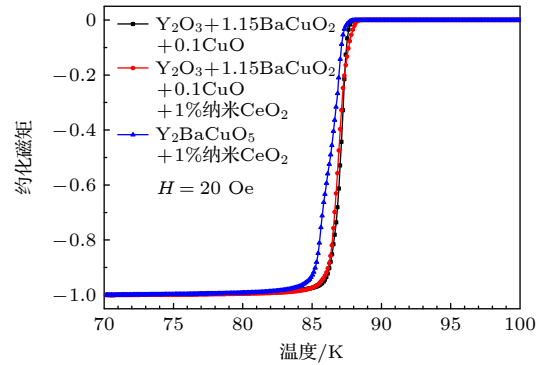


图 7 YBCO 样品的 T_c 性能

Fig. 7. T_c property of the YBCO samples.

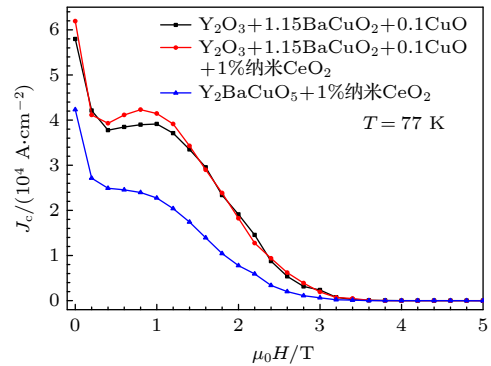


图 8 YBCO 样品的 J_c 性能

Fig. 8. J_c property of the YBCO samples.

4 结 论

本文进行了纳米 CeO_2 掺杂的 YBCO 超导块材的制备及性能研究工作. 结果表明: 1) 在质量分数为 1% 的掺杂量下, YBCO 晶体的正常生长不会受到影响, 利用 011-IG 和 211-IG 法均能成功制备生长完全的单畴 YBCO 超导块材; 2) 采用的新型坑式籽晶模式可以有效地阻止薄膜籽晶在热处理过程中的移动, 从而保证了实验的成功率; 3) 纳米

CeO₂ 掺杂可以有效细化超导块材内 Y-211 微米级粒子的尺寸, 最大粒子的尺寸约由 3 μm 降低到 2 μm, 且该方法对 011-IG 和 211-IG 工艺均有效; 4) 011-IG 法制备的纳米 CeO₂ 掺杂的样品在低外场下呈现出比未掺杂样品明显优越的 J_c 性能, 说明细化的 Y-211 粒子可以有效地提高 δI 型钉扎; 5) 相比 211-IG 法制备的样品, 011-IG 法制备的样品在磁悬浮力、微观形貌和 J_c 性能等方面表现更优越, 因此 011-IG 法是一种更有潜力的制备工艺. 本文结果对进一步提高 YBCO 超导块材的性能和优化制备工艺有重要意义.

参考文献

- [1] Durrell J H, Ainslie M D, Zhou D, Vanderbemden P, Bradshaw T, Speller S, Filipenko M, Cardwell D A 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 103501
- [2] Kenfaui D, Sibeud P F, Louradour E, Chaud X, Noudem J G 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 3996
- [3] Ma J, Yang W M, Wang M, Chen S L, Feng Z L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 227401 (in Chinese) [马俊, 杨万民, 王妙, 陈森林, 冯忠岭 2013 物理学报 **62** 227401]
- [4] Ma J, Chen Z L, Xian T, Wei X G, Yang W M, Chen S L, Li J W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 077401 (in Chinese) [马俊, 陈章龙, 县涛, 魏学刚, 杨万民, 陈森林, 李佳伟 2018 物理学报 **67** 077401]
- [5] Li G Z, Yang W M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5028 (in Chinese) [李国政, 杨万民 2010 物理学报 **59** 5028]
- [6] Yang W M, Zhi X, Chen S L, Wang M, Li J W, Ma J, Chao X X 2014 *Physica C* **496** 1
- [7] Yang P T, Yang W M, Chen J L 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 085003
- [8] Yang P, Fagnard J F, Vanderbemden P, Yang W 2019 *Supercond. Sci. Technol.* **32** 115015
- [9] Wang M, Liu Y, Wang X, Xian H, Yang W 2021 *Crystals* **11** 150
- [10] Wang M, Yang W M, Li J W, Feng Z L, Yang P T 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 035004
- [11] Yang P, Yang W, Zhang L, Chen L 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 085005
- [12] Li G Z, Chen C 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 237402 (in Chinese) [李国政, 陈超 2020 物理学报 **69** 237402]
- [13] Li G Z, Wang M 2021 *J. Cryst. Growth* **570** 126198
- [14] Li G Z, Wang M 2022 *Supercond. Sci. Technol.* **35** 015005
- [15] Li G Z, Wang M 2022 *Ceram. Int.* **48** 25034
- [16] Chen S Y, Chen I G, Wu M K 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** 916
- [17] Wang M, Yang W M, Zhang X J, Tang Y N, Wang G F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 196102 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 张晓菊, 唐艳妮, 王高峰 2012 物理学报 **61** 196102]
- [18] Chen S L, Yang W M, Li J W, Yuan X C, Ma J, Wang M 2014 *Physica C* **496** 39
- [19] Chen D X, Goldfarb R B 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 2489
- [20] Wang M, Yang W M, Ma J, Tang Y N, Zhang X J, Wang G F 2012 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **42** 346 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 马俊, 唐艳妮, 张晓菊, 王高峰 2012 中国科学: 物理学 力学 天文学 **42** 346]
- [21] Wang M, Yang W M, Fan J, Li G Z, Zhang X J, Tang Y N, Wang G F 2012 *J. Supercond. Novel Magn.* **25** 867
- [22] Wang M, Yang W M, Wang M Z, Wang X J 2013 *J. Supercond. Novel Magn.* **26** 3221
- [23] Li G Z, Wang M 2021 *Mater. Today Commun.* **29** 102771
- [24] Koblishka M R, Murakami M 2000 *Supercond. Sci. Technol.* **13** 738

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

Li Guo-Zheng^{1)†} Wang Miao²⁾

1) (*College of Physics and Materials Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China*)

2) (*School of Science, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China*)

(Received 14 June 2024; revised manuscript received 2 September 2024)

Abstract

Single-domain Y-Ba-Cu-O (YBCO) bulk superconductors can be widely used in the superconducting maglev, cryomagnets, motors/generators fields. In order to improve the performance of the YBCO bulk superconductors further, in this work, nano-CeO₂ doped YBCO bulk superconductors are fabricated by two infiltration growth techniques (011-IG and 211-IG) respectively, in which two solid pellets of compositions Y₂O₃+1.15BaCuO₂+0.1CuO+1wt.% nano-CeO₂ and Y₂BaCuO₅ (Y-211)+1 wt.% nano-CeO₂ are employed. And a novel pit-type seeding mode is used to prevent the film seed from moving in the heat treatment process, then the growth morphologies, microstructures and superconducting properties of the samples are investigated. The results show that at a low doping level (1 wt.%), the normal growth of the YBCO crystal is not affected, and fully-grown single-domain YBCO bulk superconductors can be successfully prepared by the two techniques. Furthermore, the positions of the seeds do not move at all, which proves the effectiveness of the new seeding mode. The perpendicular growth sector boundaries on the top surfaces of the samples and clear (00*l*) series X-ray diffraction (XRD) peaks both prove the high *c*-axis orientations and high growth quality of the samples. The scanning electron microscopy (SEM) results indicate that the nano-CeO₂ doping can effectively refine the sizes of the Y-211 micro-particles in the bulk superconductors, and this method is applicable to both techniques. Low-temperature magnetization measurement shows that the nano-CeO₂ doped sample prepared by the 011-IG method shows obviously better *J_c* property than the undoped sample at low fields, indicating that the refined Y-211 particles can effectively enhance the δl -type pinning. In addition, compared with the 211-IG-processed sample, the 011-IG-processed sample performs better in terms of levitation force, microstructure and *J_c* property, thus the 011-IG method is a more promising preparation process. The results of this study are important in improving the performance of the YBCO bulk superconductors and optimizing the fabrication technique further.

Keywords: single-domain Y-Ba-Cu-O, infiltration growth, nano-CeO₂ doping, superconducting property

PACS: 74.62.Dh, 74.72.-h, 74.25.-q

DOI: [10.7498/aps.73.20240832](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240832)

CSTR: [32037.14.aps.73.20240832](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20240832)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51872199).

† Corresponding author. E-mail: ligz1984@126.com

纳米CeO₂掺杂的YBCO超导块材的制备及其性能

李国政 王妙

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

Li Guo-Zheng Wang Miao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 197402 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240832

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240832>

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

NiFe₂O₄纳米粒子掺杂对单畴YBCO超导块材性能的影响

Influence of NiFe₂O₄ nanoparticle doping on properties of single-domain YBCO bulk superconductors

物理学报. 2020, 69(23): 237402 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201116>

二次单畴化制备GdBCO超导块材的方法及其性能

Fabrication process and superconducting properties of recycling multi-domain GdBCO bulk superconductors using improved infiltration technique

物理学报. 2021, 70(15): 158101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202141>

H⁺离子辐照Y_{0.5}Gd_{0.5}Ba₂Cu₃O_{7δ}超导层中的缺陷演化

Defect evolution in Y_{0.5}Gd_{0.5}Ba₂Cu₃O_{7δ} superconducting layer irradiated by H⁺ ions

物理学报. 2022, 71(23): 237401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221612>

EuBa₂Cu₃O_{7δ}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 EuBa₂Cu₃O_{7δ} superconducting strips

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

Bi₂O₂Se纳米线的生长及其超导量子干涉器件

Growth of Bi₂O₂Se nanowires and their superconducting quantum interference devices

物理学报. 2024, 73(4): 047803 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231600>

Cu掺杂β-Ga₂O₃薄膜的制备及紫外探测性能

Preparation and ultraviolet detection performance of Cu doped β-Ga₂O₃ thin films

物理学报. 2023, 72(19): 198503 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230971>