



## 二次单畴化制备GdBCO超导块材的方法及其性能

王妙 杨万民 王小梅 咎雅婷 陈森林 张明 胡成西

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

Wang Miao Yang Wan-Min Wang Xiao-Mei Zan Ya-Ting Chen Sen-Lin Zhang Ming Hu Cheng-Xi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 158101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202141

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202141>

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

#### NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>纳米粒子掺杂对单畴YBCO超导块材性能的影响

Influence of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 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>

#### BaO掺杂对单畴GdBCO超导块材性能的影响(二)

Influences of BaO doping on the properties of single domain GdBCO bulk superconductors (II)

物理学报. 2017, 66(16): 167401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.167401>

#### 空心圆柱形永磁体内径对单畴GdBCO超导块材磁悬浮力的影响

Effect of inner diameter of hollow cylindrical permanent magnet on levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor

物理学报. 2018, 67(7): 077401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172418>

#### FeSe基超导单晶与薄膜研究新进展:自旋向列序、电子相分离及高临界参数

New progress of FeSe-based superconducting single crystals and films: Spin nematicity, electronic phase separation, and high critical parameters

物理学报. 2018, 67(20): 207410 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181638>

#### 拓扑超导体FeSe<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub>单晶超导性能与磁通钉扎

Superconducting and flux pinning properties of FeSe<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub> topological superconductors

物理学报. 2020, 69(23): 237401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201125>

#### 利用单轴压强下的电阻变化研究铁基超导体中的向列涨落

Nematic fluctuations in iron-based superconductors studied by resistivity change under uniaxial pressure

物理学报. 2018, 67(12): 127401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180627>

# 二次单畴化制备 GdBCO 超导块材的方法及其性能\*

王妙<sup>1)2)†</sup> 杨万民<sup>2)</sup> 王小梅<sup>1)</sup> 昝雅婷<sup>2)</sup>  
陈森林<sup>2)</sup> 张明<sup>1)</sup> 胡成西<sup>1)</sup>

1) (西安航空学院理学院, 西安 710077)

2) (陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

(2020 年 12 月 16 日收到; 2021 年 3 月 19 日收到修改稿)

高质量单畴  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (REBCO) 超导块材具有广泛的应用前景, 但制备过程中极易产生大量多畴样品, 致使成功率明显下降、成本显著提高, 并制约其进一步批量化和实用化的进程. 受顶部籽晶熔渗生长 (TSIG) 方法的启发, 本文提出了一种对生长失败的 GdBCO 超导块材重新单畴化织构生长的新方法, 即将生长失败的样品进行预处理后作为固相源坯块, 然后采用改进后的 TSIG 法进行二次单畴化织构生长, 并成功地制备出了一系列二次单畴化的 GdBCO 超导样品, 同时, 对样品的超导性能及微观结构进行了研究. 结果表明, 所制备的二次单畴化 GdBCO 超导样品的磁悬浮力均大于 30 N, 样品的捕获磁通密度均在 0.3 T 以上, 捕获磁通效率高达 60% 以上, 该结果为进一步发展低成本、高效率制备 REBCO 超导体的新方法提供了科学依据和新思路.

**关键词:** 单畴 GdBCO 超导体, 二次单畴化生长, 顶部籽晶熔渗, 超导性能

**PACS:** 81.10.-h, 74.25.Sv, 74.72.-h, 74.25.-q

**DOI:** 10.7498/aps.70.20202141

## 1 引言

高温超导体自 1987 年被国内外科学家们发现以来, 一直是人们关注的热点和重点内容之一<sup>[1,2]</sup>. 单畴  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (REBCO) 高温超导块材由于具有大的磁悬浮力、强的捕获磁通密度<sup>[3,4]</sup>、高的临界转变温度  $T_c$ 、以及良好的自稳定磁悬浮等优良特点<sup>[5,6]</sup>, 在超导磁悬浮列车、微型强磁体、超导电机、以及超导体磁分离系统等高新技术领域有着非常广泛的应用前景和巨大的发展潜力<sup>[3,4,7-11]</sup>.

目前, REBCO 高温超导块材常用的制备方法主要有两种, 一种是顶部籽晶熔融织构生长 (TSM-

TG) 方法, 该方法将以  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (RE123) 和  $\text{RE}_2\text{BaCuO}_5$  (RE211) 为主的混合粉体按一定的比例压制坯块, 然后进行熔化慢冷方式生长. 由于在高温状态下容易发生 RE123 异质熔化, REBCO 样品在生长过程中极易发生严重的收缩、形变以及液相流失等现象, 并导致整个样品内部出现大量的孔洞、裂纹以及 RE211 粒子的团簇, 从而导致整个样品的生长失败<sup>[12-14]</sup>. 另一种是顶部籽晶熔渗生长 (TSIG) 方法, 该方法是将 RE211 与富 Ba, Cu 液相源分别进行压坯, 在升温过程中液相源辅助块逐渐熔化, 同时液相源受 NdBCO 籽晶诱导, 在其毛细力的作用下向上渗透到 RE211 固相坯块中, 同时在随后的慢冷生长过程中逐步完成 RE123 超

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51802247, 51872199)、陕西省高校科协青年人才托举计划 (批准号: 20190422) 和陕西高校第三批“青年杰出人才支持计划”资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [cwnanmao@126.com](mailto:cwnanmao@126.com)

导晶体的织构生长. 这种方法有效地解决了样品的收缩、形变等技术问题, 同时对样品的微观组织结构也进行了一定的改善, 是一种较为优越的制备 REBCO 超导块材的方法<sup>[15–18]</sup>. 然而, 不论是采用 TSMTG 方法, 还是 TSIG 方法, 在样品的制备过程中都会产生大量的低质量、多畴 REBCO 样品, 而且存在着制备周期冗长、制备成本高昂、制备效率低下、环境污染严重等一系列问题.

因此, 寻找一种低成本、高效率制备高质量单畴 REBCO 高温超导块材的新方法仍然是目前研究的热点内容和迫切需求. 在我们的前期工作中, 为了降低 REBCO 高温超导块材的制备成本、简化样品的制备工艺、提高样品的制备效率, 进行了将传统固相源 (RE211)→新固相源 (RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+BaCuO<sub>2</sub>), 传统液相源 (RE123+Ba<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>8</sub> (RE035))→RE-基液相源 (RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+10 BaCuO<sub>2</sub>+6 CuO) 的改进, 在提高工作效率的同时, 也使 REBCO 高温超导块材的性能得到了显著提升<sup>[19]</sup>. 然而研究发现, 同一批次生长失败的多畴 REBCO 超导块材仍高达 50% 甚至以上<sup>[20,21]</sup>, 这严重影响着样品的制备成本, 制约其实用化进程. 而目前对于多畴 REBCO 超导块材回收再利用的制备方法尚不成熟. 因此, 积极探索一种有关多畴 REBCO 样品的二次单畴化生长的新方法及其反应机制仍然是该领域人们研究的重点内容.

对于多畴 REBCO (RE = Y, Gd) 超导样品二次单畴化再生长的研究已经有大量的文献报道. 从文献可看到, 目前主要存在两种对多畴 REBCO 块材进行二次单畴化重新再回收利用方面的研究: 一种是通过物理方法进行重新织构, 即将多畴 REBCO 样品重新粉碎并研磨成粉体, 然后将这些粉体按照 TSMTG 生长方法进行称量、压坯、烧结等步骤重新再生长, 从而制备出具有较好单畴形貌的 REBCO 高温超导块材样品<sup>[22,23]</sup>, 但该方法所制备的样品中 RE211 粒子分布并不均匀, 这在一定程度上会影响样品磁通钉扎中心的均匀分布, 从而进一步导致整个样品的超导性能下降; 另一种是将多畴 REBCO 样品的上表面进行预处理, 然后将熔融初始粉体压制在与多畴样品等直径的坯块, 并进行熔融织构生长<sup>[24,25]</sup>. 结果表明, 虽然通过这两种方法均能成功地将生长失败的多畴样品进行回炉再生长, 并且制备成形貌较好的具有单畴特征的样品, 但是这两种生长方法所制备出的重新单畴化

织构样品的超导性能较低, 同时其二次单畴化再生长技术非常复杂且制备成功率较低, 约为 20%, 这远远不能满足未来工业化产出及实用化进程的需求. 同时, 这两种方法均是在 TSMTG 方法的基础上制备的, 所制备的二次单畴化织构样品中 RE211 粒子的分布并不均匀, 这是导致所制备的二次生长样品的超导性能不高的可能原因之一. 那么, 如果采用 TSIG 方法对多畴样品进行二次单畴化重新织构生长, 会是什么结果呢?

针对这一问题, 本文介绍了一种采用 TSIG 法对生长失败的 GdBCO 高温超导块材进行二次单畴化重新织构再生长的制备方法, 这种制备方法简单可行, 且制备成功率在 90% 以上<sup>[26]</sup>, 可以在最大程度上降低 GdBCO 超导块材的制备成本, 对于 GdBCO 高温超导块材今后实用化进程的发展应用有着深远影响.

## 2 实验内容

首先将分析纯的 BaCO<sub>3</sub> (≥ 99.9%) 和 CuO (≥99.9%) 粉末按照 CuO:BaCO<sub>3</sub> = 1:1 的摩尔比进行配比称量, 采用传统的固相烧结法经多次烧结球磨后, 可得到相纯的 BaCuO<sub>2</sub> 先驱粉体<sup>[27]</sup>. 然后, 选择生长失败的多畴、废弃 GdBCO 样品进行预处理, 将其上、下表面分别进行磨、抛处理后作为固相坯块; 接着, 本文采用 Y-基液相源<sup>[19]</sup>, 称量 20 g 的液相源粉体压制直径为 30 mm 的圆柱形坯块作为液相源先驱块; 接着压制与液相源先驱块等直径圆柱形坯块作为支撑块以防止液相源在生长过程中的流失<sup>[19]</sup>; 再依次将其按照轴对称的方式进行叠放, 并在固相坯块的上表面中心放置一 NdBCO 籽晶进行二次诱导生长, 整个二次单畴化重新再织构生长的制备方法流程如图 1(a) 所示. 最后将准备好的样品先驱块放置于自行研制的具有温度梯度的高温晶体生长炉内<sup>[28, 29]</sup>, 按照图 1(b) 所示的热处理方式进行二次单畴化重新织构再生长. 最后, 将生长好的样品在氧气氛围下从 430 °C 到 350 °C 慢冷 200 h 进行渗氧, 经这样处理的样品在临界温度以下将具备超导性能. 随后, 采用三维磁力&磁场测试装置<sup>[30]</sup> 在液氮环境 (77 K) 下对样品的磁悬浮力以及捕获磁通密度进行了测量, 同时利用综合物性测量系统 (PPMS) 对样品的临界温度及临界电流密度进行了测试和分析.

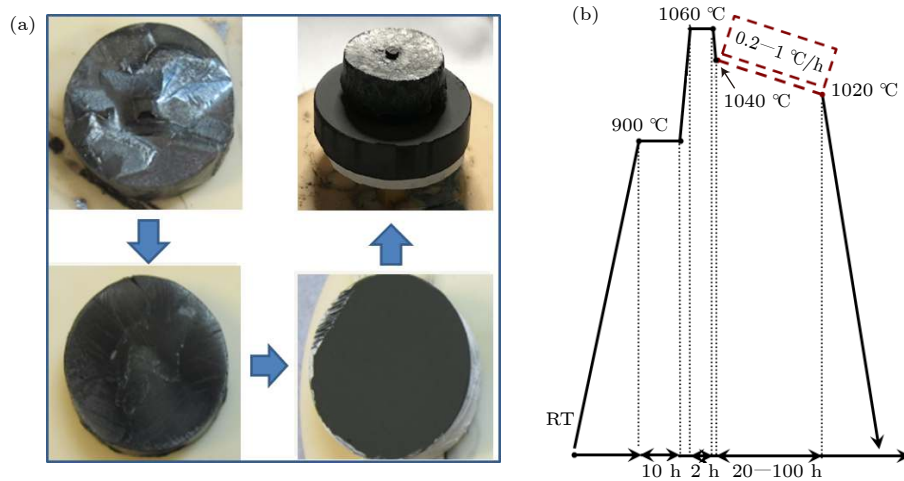


图 1 二次单畴化制备 GdBCO 样品的流程图

Fig. 1. Preparation flow chart of recycling the failed samples.

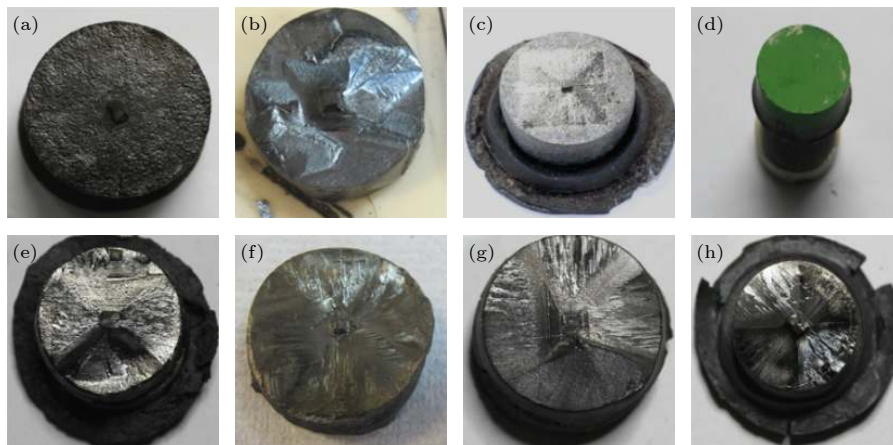


图 2 GdBCO 超导样品的表面宏观形貌图 (a)–(d) 生长失败的 GdBCO 样品; (e)–(h) 二次单畴化生长后对应的样品

Fig. 2. Top view of the GdBCO bulk superconductors: (a)–(d) Failed GdBCO samples; (e)–(h) recycled samples.

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 样品宏观形貌分析

图 2(a)–(d) 所示均为生长失败的废弃 GdBCO 样品, 图 2(a) 样品是由于生长的过程中生长窗口温度过高而导致整个样品未生长, 仅在籽晶周围存在生长痕迹; 图 2(b) 样品是由于籽晶缺陷和热处理程序不当而使整个样品表面出现随机成核现象, 致使整个样品生长失败; 图 2(c) 样品是由于生长窗口过窄而没有长满整个样品表面; 图 2(d) 样品是为研究熔渗生长规律, 在 900 °C 进行保温 20 h 后随炉冷却得到的样品. 对上述样品采用二次单畴化重新织构再生长, 生长后的样品形貌分别如图 2(e)–(h) 所示. 可以看到, 二次再生长的 GdBCO

样品表面均生长出四个扇区, 而且十字花纹明显, 具有良好的单畴形貌特征. 如果再进行仔细观察, 在二次生长样品的籽晶附近还可以看到初次生长的痕迹, 但是二次生长在籽晶的诱导下所形成的单畴形貌与初次生长情况并无关系, 只与二次生长时籽晶放置的位置有关, 如图 2(f) 和图 2(g) 所示. 这表明, 该方法可成功地对生长失败的多畴、废弃 GdBCO 超导块材进行二次单畴化重新织构再生长, 可大大降低超导块材的制备成本, 有助于 GdBCO 超导块材的批量化生产.

#### 3.2 样品的超导性能分析

在零场冷 (ZFC)、77 K 液氮温度条件下, 采用自主研发的三维磁力&磁场测试装置对二次单畴化 GdBCO 超导样品的磁悬浮力进行了测试, 结果



如图 3 所示, 其中内插图 of 各样品的最大磁悬浮力. 可以看出, 利用二次单畴化制备方法生长的样品均具有较好的磁悬浮力, 本文选取的四个样品磁悬浮力在 33.09—43.37 N 之间, 经过计算可知, 样品的磁悬浮力密度在 10.53—13.81 N/cm<sup>2</sup>, 均高于 10 N/cm<sup>2</sup>, 此结果和初次制备的单畴 GdBCO 超导块材的磁悬浮力可进行比拟. 同时, 从样品的磁悬浮力测试接近和远离的两条曲线间的间隙<sup>[31]</sup>也可以看出, 二次单畴化制备的样品两条曲线间的间隙也比初次制备的样品间距<sup>[31]</sup>要窄一些, 这充分表明采用该方法制备的样品具有良好的磁通钉扎特性.

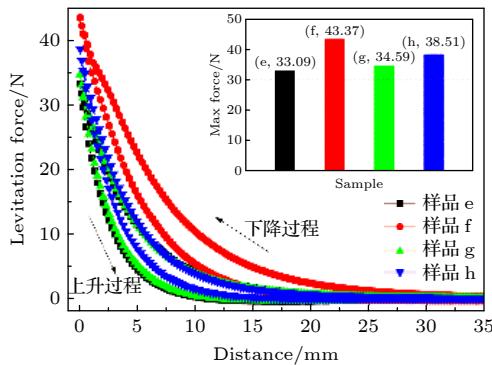


图 3 不同二次单畴化制备 GdBCO 超导样品的磁悬浮力曲线

Fig. 3. Levitation force of the recycled GdBCO samples.

为了研究样品的磁通钉扎能力, 采用静磁场充磁方式分别对不同二次单畴化制备样品在 77 K 液氮温度条件下进行充磁 (场冷, FC), 充磁磁场采用 NdFeB 永久磁体表面磁场, 即  $B_{app} = 0.5$  T, 待其稳定后撤掉永磁体, 超导块材便会将部分磁场捕获, 使其自身具有磁性. 充磁完成后使用三维磁力 & 磁场测试装置测量超导块材表面的磁场分布, 将低温霍尔探头放置于距离样品上表面 0.5 mm 的位置, 通过设置探头的测试路径, 完成对样品表面磁场的测试. 图 4 为不同二次单畴化制备 GdBCO 超导块材表面三维 (3D) 和二维 (2D) 捕获磁通密度分布图, 可以看到, e, g, h 三个样品的捕获磁通密度均呈现出圆锥形包络面, 同时从 2D 等高值图也可以看到, 捕获磁通密度分布图较为对称, 都只有一个对称单峰, 磁单畴特征明显. 尽管图 4(b) 所示的样品 f 出现了两个峰, 即样品具有两个磁畴区域, 但是样品沿径向的最大捕获磁通密度达到了 0.39 T, 该值与初次生长的单畴 GdBCO 样品<sup>[31]</sup>

相比要大很多, 此结果也再一次证明了这种二次单畴化制备生长技术的可行性. 对样品的捕获效益采用文献<sup>[32]</sup>中的公式进行计算, 可得出二次单畴化制备的 GdBCO 超导样品的捕获效率均在 60% 以上, 这充分表明采用该方法可以获得具有较强捕获磁通能力的 GdBCO 超导块材.

为了测量采用二次单畴化制备的 GdBCO 超导样品的  $T_c$  性能, 以样品 f 为例进行了测试. 如图 5 所示, 分别从样品的 a1, b2, b3, c2, c3 五个不同位置取大小约为 1 mm × 2 mm × 2 mm 的小试样品, 采用 PPMS 在 0.01 T 的外界磁场条件下进行直流磁化率测试 (所加磁场与小试样品的  $c$  轴方向平行).

图 6 是样品 f 各个不同位置的约化磁矩与温度的关系曲线图, 其中内插图是样品的原始数据. 可以看出, b2, b3, c2 以及 c3 四个小试样品的起始转变温度均为 92 K, 其中 b3, c2 以及 c3 三个样品的转变宽度  $\Delta T = 1$  K, 而 b2 小试样品有着很大的转变宽度,  $\Delta T > 5$  K, 出现这一结果的可能原因是测试样品所选取的位置恰好位于两个磁畴之间, 如图 4(b) 所示. a1 小试样品的起始转变温度约为 91 K, 其转变宽度  $\Delta T = 2$  K, 该处的  $T_c$  略低于其他的小试样品, 是因为该样品处于 NdBCO 籽晶附近, 由于籽晶中的  $Nd^{3+}$  在高温生长过程中有少许的扩散从而会影响样品的性能, 因此该位置样品的性能略低.

同时, 采用 PPMS 仪器在 77 K 液氮温度下对上述小试样品的磁矩进行了测量, 测量时所加的外磁场与样品的  $c$  轴方向平行. 对于样品的临界电流密度 ( $J_c$ ) 采用扩展的 Bean-Model 进行计算:<sup>[33]</sup>

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

其中  $\Delta M$  (emu) 为测试过程中增加磁场与降低磁场所对应的同一磁场的磁矩之差;  $a$  (cm) 和  $b$  (cm) 分别对应的是小试样品  $a$ - $b$  面上的尺寸 ( $a < b$ ),  $V$  (cm<sup>3</sup>) 是小试样品的体积.

图 7 是二次单畴化 GdBCO 超导块材的临界电流密度, 可看出 b3 和 c3 两位置的  $J_c$  值基本持平, 约为  $6 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, 而位于 a1, b2 和 c2 三个位置的样品的  $J_c$  值明显偏小, 小于  $5 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>, 同时, 从图 7 还可以看到, 远离 NdBCO 籽晶的位置, 样品的  $J_c$  明显大于位于籽晶附近的样品, 这与

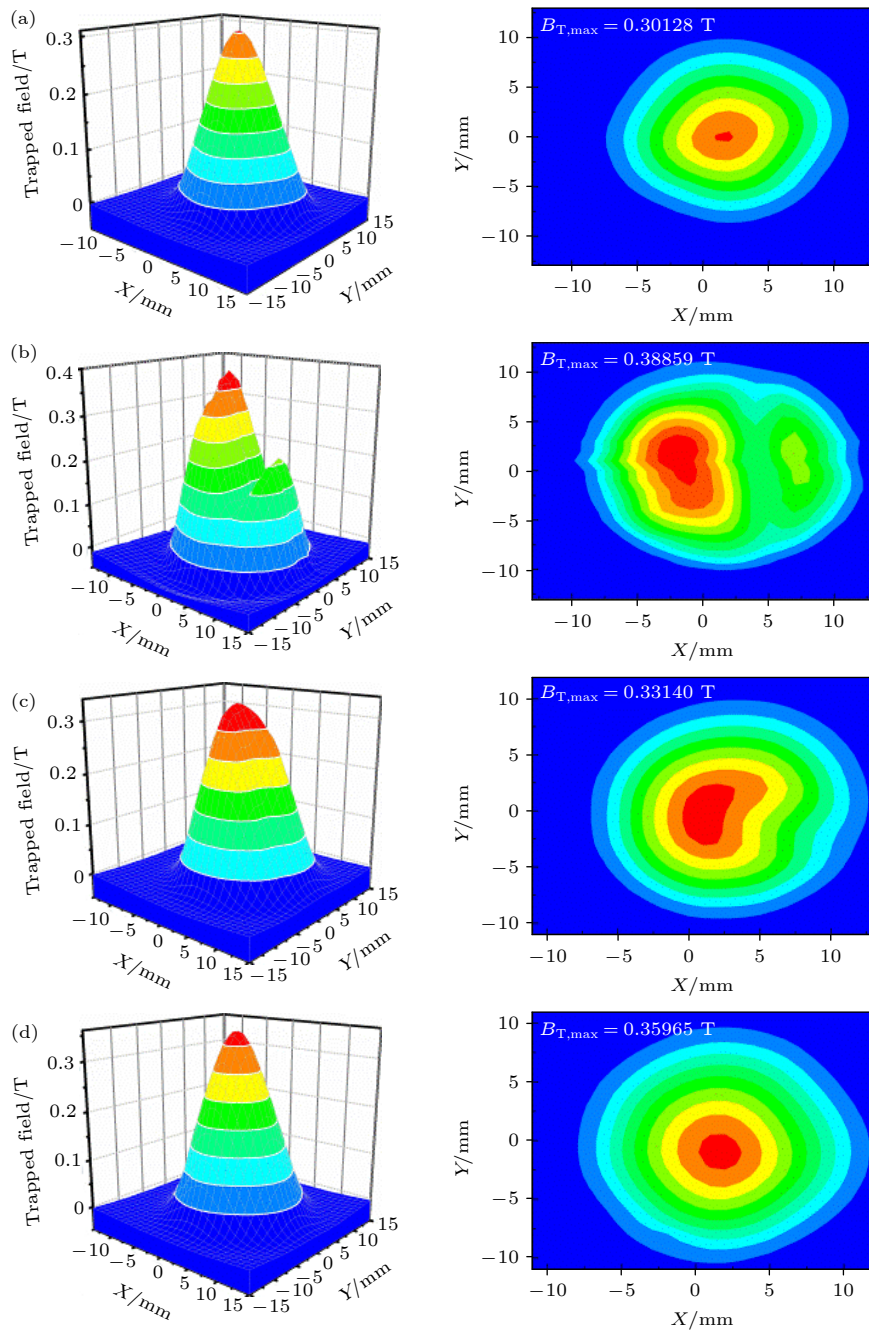


图 4 不同二次单畴化制备 GdBCO 超导样品的捕获磁通密度分布图 (a) 样品 e; (b) 样品 f; (c) 样品 g; (d) 样品 h  
 Fig. 4. Trapped field of the recycled GdBCO samples: (a) Sample e; (b) sample f; (c) sample g; (d) sample h.

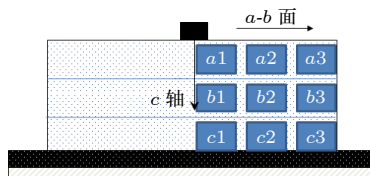


图 5 在二次单畴化制备的 GdBCO 超导样品的纵切面上取样示意图  
 Fig. 5. Schematic of the specimens cut from the recycled GdBCO sample.

相关的文献报道结果<sup>[34,35]</sup>一致。但是，值得注意的是，该样品的不可逆磁场为  $B_{irr} = 4$  T，与初次生长良好的单畴 GdBCO 样品相比略微偏小（正常的 GdBCO 超导样品的不可逆磁场  $B_{irr} = 5$  T<sup>[36]</sup>），引起这一结果的原因有可能是样品在二次生长的过程中虽然形成了单畴形貌，但是初次生长在样品内部造成的裂纹、气孔等微观结构依然存在，不会随着二次再生长而消失，因此造成了样品的不可逆磁场下降。

### 3.3 样品的微观形貌分析

为了进一步解释二次单畴化制备方法在不降低样品超导性能的前提下可以正常使用,对样品进行了微观结构分析.图8所示为样品f的9个不同位置的微观形貌图,图中灰白色的粒子是Gd211固相粒子.从图8可以看到,Gd211固相粒子均匀地分布在样品中,同时,该粒子在Gd123基体中并没有发生任何的偏析,这一点与初次生长的单畴GdBCO样品由于产生捕获-推出效应从而使样品边缘的Gd211粒子密度大于样品中心位置的密度有所不同,究其原因,可能是由于二次单畴化制备样品在生长过程中人为提供了多余液相的补给,样品在二次生长的过程中固相粒子Gd211处于半熔融状态中,大量液相的存在使得Gd211粒子有充足的液相去发生包晶反应,而多余的液相可以将大量分布在生长前沿的Gd211粒子均匀地分散开来,使其不易发生团簇现象,这是使得Gd211粒子均匀地分布在二次生长的GdBCO超导样品中的可能原因.同时,从图8还可以发现,样品中Gd211固相粒子的粒径分布也较为均匀,这一结果对于进一步研究二次单畴化重新织构方法的生长机制提供了重要依据.

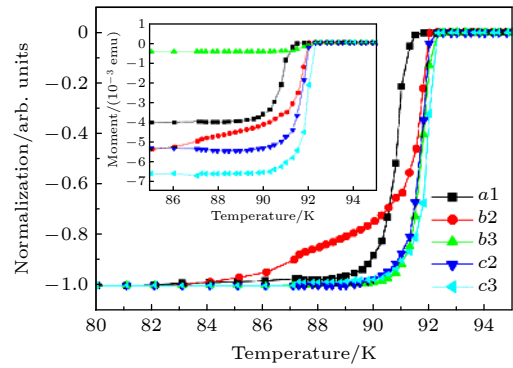


图6 二次单畴化制备GdBCO超导样品f的临界转变温度 ( $1 \text{ emu} = 10^{-3} \text{ A}\cdot\text{m}^2$ )

Fig. 6. Superconducting transition temperature of the recycled GdBCO sample f.

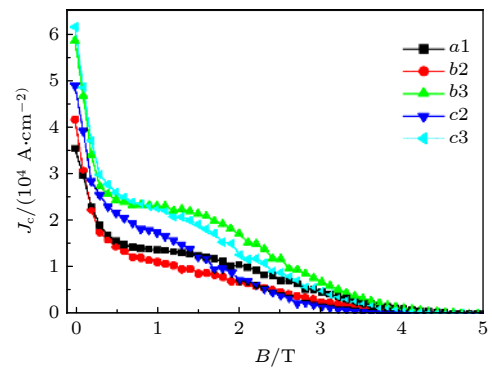


图7 二次单畴化制备GdBCO超导样品f的临界电流密度

Fig. 7. The  $J_c$  of the recycled GdBCO sample f.

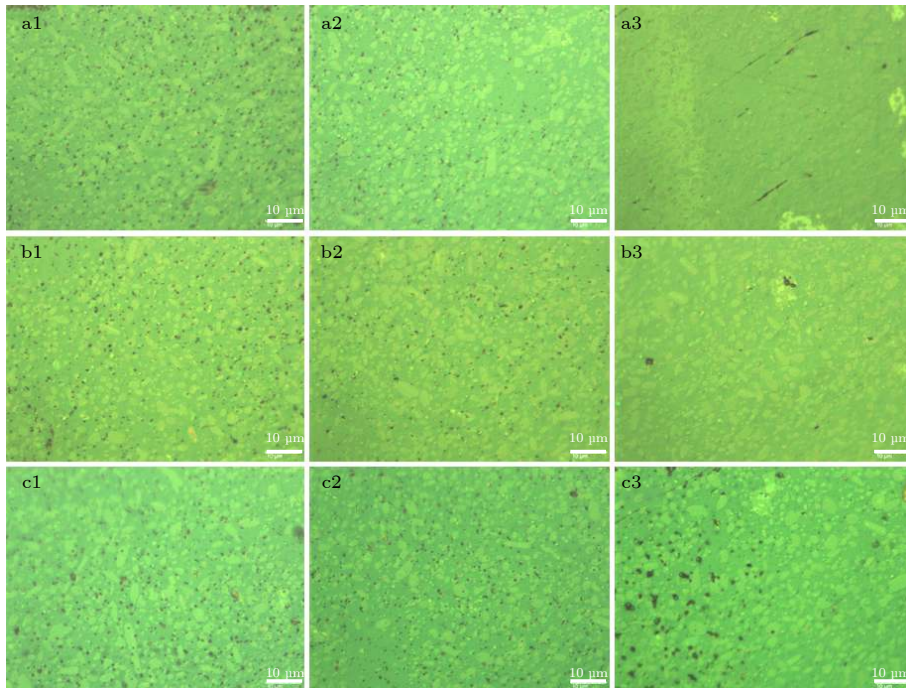


图8 二次单畴化制备GdBCO超导样品f不同位置的微观形貌图

Fig. 8. Microstructure of the specimens cut from the recycled GdBCO sample f.



## 4 结 论

本文提出了一种能同时降低制备成本、提高制备成功率和样品超导性能的二次单畴化制备 GdBCO 块材的新方法, 该制备方法简单可行, 在整个制备过程中仅需要提前制备  $\text{BaCuO}_2$  一种先驱粉体, 可在最大程度上降低 GdBCO 超导块材的制备成本; 同时, 对样品超导性能的分析表明, 二次单畴化制备 GdBCO 样品的磁悬浮力均在 30 N 以上, 样品的捕获效率均在 60% 以上, 而且也表现出较高的临界温度 (约为 92 K) 和临界电流密度 ( $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ). 这一结论充分表明采用二次单畴化制备方法可以对生长失败的样品进行有效的回收再利用, 并可获得具有较强捕获磁通能力的超导块材, 该结果对于我们向 REBCO 高温超导块材的实用化理念又迈进了一步.

## 参考文献

- [1] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 908
- [2] Chu C 1987 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **84** 4681
- [3] Durrell J H, Dennis A R, Jaroszynski J, Shi Y H, Cardwell A D 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 082001
- [4] Tomita M, Murakami M 2003 *Nature* **421** 517
- [5] Yang P T, Yang W M, Abula Y, Su X Q, Zhang L L 2017 *Ceram. Int.* **43** 3010
- [6] Yang W M, Wang M 2013 *Physica C* **493** 128
- [7] Ainslie M, Fujishiro H, Ujiie T 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 065008
- [8] Jin J X, Guo Y G, Zhu J G 2007 *Physica C* **460** 1445
- [9] Deng Z, He D, Zheng J 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 3600106
- [10] Tomita M, Fukumoto Y, Suzuki K, Ishihara A, Muralidhar M 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 023912
- [11] Basaran S, Sivrioglu S 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 035008
- [12] Muralidhar M, Szuki K, Ishihara A, Jirsa M, Fukumoto Y, Tomita M 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 124003
- [13] Cardwell D A, Shi Y H, Hari Babu N, Pathak S K, Dennis A R, Iida K 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 034008
- [14] Cheng L, Li T, Yan S, Sun L, Yao X, Puzniak R 2011 *J. Am. Ceram. Soc.* **94** 3139
- [15] Meslin S, Noudem J G 2004 *Supercond. Sci. Technol.* **17** 1324
- [16] Congreve J J, Shi Y H, Dennis A R, Durrell J H, Cardwell D A 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 035008
- [17] Devendra Kumar N, Rajasekharan T, Sechubai V 2013 *Physica C* **495** 55
- [18] Wang M, Yang W M, Li J W, Feng Z L, Yang P T 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 035004
- [19] Wang M, Yang W M, Li J W, Feng Z L, Chen S L 2013 *Physica C* **492** 129
- [20] Hari Babu N, Shi Y H, Pathak S K, Dennis A R, Cardwell D A 2011 *Physica C* **471** 169
- [21] Li T Y, Cheng L, Yan S B, Sun L J, Yao X, Yoshida Y, Ikuta H 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 125002
- [22] Iida K, Löwe K, Kühn L, Nenkov K, Fuchs G, Krabbes G, Behr G, Holzapfel B, Schultz L 2009 *Physica C* **469** 1153
- [23] Pathak S K, Hari Babu N, Dennis A R, Iida K, Strasik M, Cardwell D A 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 065012
- [24] Xu H H, Cheng L, Yan S B, Yu D J, Guo L S, Yao X 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 103910
- [25] Xu H H, Chen Y Y, Cheng L, Yan S B, Yu D J, Guo L S, Yao X 2013 *J. Supercond. Novel Magn.* **26** 919
- [26] Shi Y, Namburi D, Wang M, Durrell J, Dennis A, Cardwell D 2015 *J. Am. Ceram. Soc.* **98** 2760
- [27] Yang W M, Zhi X, Chen S L, Wang M, Ma J, Chao X X 2014 *Physica C* **496** 1
- [28] Yang W M, Zhou L, Feng Y, Zhang P X, Zhang C P 2006 *J. Alloys compd.* **415** 276
- [29] Guo Y X, Yang W M, Li J W, Guo L P, Li Q 2015 *Cryst. Growth Des.* **15** 1771
- [30] Chen S L, Yang W M, Li J W, Yuan X C, Ma J, Wang M 2014 *Physica C* **496** 39
- [31] Yang P T, Yang W M, Chen J L 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 085003
- [32] Wang M, Yang W M, Yang P T, Wang X M, Zhang M, Hu C X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 227401 (in Chinese) [王妙, 杨万民, 杨芑焱, 王小梅, 张明, 胡成西 2016 物理学报 **65** 227401]
- [33] Chen D X, Goldfarb R B 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 2489
- [34] Kumar N D, Shi Y H, Palmer K G, Dennis A D, Durrell J H, Cardwell D A 2016 *J. Eur. Ceram. Soc.* **36** 615
- [35] Iida K, Hari Babu N, Shi Y H, Cardwell D A, Murakami M 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** 641
- [36] 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]



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

Wang Miao<sup>1)2)†</sup> Yang Wan-Min<sup>2)</sup> Wang Xiao-Mei<sup>1)</sup> Zan Ya-Ting<sup>2)</sup>  
Chen Sen-Lin<sup>2)</sup> Zhang Ming<sup>1)</sup> Hu Cheng-Xi<sup>1)</sup>

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

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

( Received 16 December 2020; revised manuscript received 19 March 2021 )

## Abstract

High temperature superconductor has become one of the hotspots of research, because of its high critical temperature, strong trapped flux density, stable suspension characteristics and large magnet levitation force. The single domain REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  (REBCO) superconductors have the wide and potential applications in the high-tech fields, such as micro-magnet superconducting maglev train, superconducting motor and superconducting magnetic separation system. However, a large number of multi-domain samples are easy to produce in the preparation process, which leads the success rate to decrease significantly and the cost to increase considerably, which restricts its practical application process. Inspired by the top seeded infiltration growth method, we develop a reliable method of recycling failed GdBCO sample by re-supplementing the liquid phase lost in the primary growth process and pretreating the failed sample as solid phase source billets. We recycle a series of GdBCO samples by using this new technique successfully. The growth morphology, superconducting properties, and microstructures of the recycled GdBCO bulk superconductors are investigated in detail in this study. The results show that the magnetic levitation forces of the recycled GdBCO samples are all greater than 30 N, their magnetic flux densities are all above 0.3 T, and their capture efficiencies are above 60%. These results provide the scientific basis and new ideas for developing the low cost and high efficient yield of fabrication of the REBCO bulk superconductors.

**Keywords:** single domain GdBCO bulk superconductor, recycling the failed bulk using textured growth, top-seeded infiltration growth, superconducting properties

**PACS:** 81.10.-h, 74.25.Sv, 74.72.-h, 74.25.-q

**DOI:** 10.7498/aps.70.20202141

\* Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 51802247, 51872199), the Young Talent Fund of University Association for Science and Technology in Shaanxi Province, China (Grant No. 20190422), and the 3rd Batch of Young Outstanding Talents Support Program for Colleges and Universities in Shaanxi Province, China.

† Corresponding author. E-mail: [cwnanmao@126.com](mailto:cwnanmao@126.com)