文章编号：1007 - 4252(2020)04 - 0004 - 282

制备高温超导块材的新型处理工艺概述

袁玖玮[1]，张玉凤[1,*]，张嘉颖[1]，娄紫薇[1]，徐燕[1]，徐建明[2]，周罗增[2]
(1. 上海电力大学数理学院，上海 201306；2. 上海空间电源研究所，上海 200245)

摘要： 高温超导块材 $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$(RE 为稀土材料，即 Y，Gd，Sm 等)的临界电流密度和捕获磁通强度性能是影响超导块材在工程应用中的重要因素。要实现该类材料的产业化应用，必须解决下面几点的技术难题。一是要建立一套成熟的制备工艺，实现单畴超导块材的批量化制备。二是制备的超导块材的性能要比较高(包括磁悬浮力、磁通捕获等)，以满足产业化生产的技术指标。这就需要样品具有较大的尺寸且具有较大临界电流密度。文章综述了近几年来 $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 超导块材的几种新型制备方法，为超导块材的实际应用提供了一定的实验数据。

关键词： 高温超导块材 $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$；制备工艺；大尺寸；临界电流密度
中图分类号：(O511)　　**文献标志码：** A

Overview of the new processing technology for the preparation of high-temperature superconducting bulks

YUAN Jiu wei[1], ZHANG Yu feng[1,*], ZHANG Jia ying[1], LOU Zi wei[1], XU Yan[1], XU Jian ming[2], ZHOU Luo zeng[2]
(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China;
2. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: The performance of the critical current density and the trapped magnetic flux performance of $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$(RE, rare earth ma-terial) high-temperature superconductor bulks are important factors to affect the engineering applications of the superconductor bulks. To realize the industrial application of this kind of materials, the followed technical problems must be solved. One is a mature production process to realize the batch production of single-domain superconductor bulks by a nature production process, The other is the performance of the prepared superconductor bulk should be relatively high, such as magnetic levitation force, magnetic flux capture, etc, in order to meet the technical indicators of industrial production. The sample with a larger size and a larger critical current density is required. This arti-

收稿日期： 2020-05-21；　**修订日期：** 2020-06-23
基金项目： 国家自然科学基金(批准号：11004129)；留学回国人员科研启动基金(SRF for ROCS，SEM)；上海市教育委员会科研创新项目(批准号：11YZ197，12ZZ174)；上海市自然科学基金(批准号：16ZR1422700)。
作者简介： 袁玖玮(1995-)，女，硕士研究生，主要研究方向为超导块材(E-mail：1067049759@qq.com)。
通讯作者： 张玉凤，主要研究方向为超导材料的性能与应用研究(E-mail：2009000018@shiep.edu.cn)。

cle reviews the preparation methods of $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconductor bulks in recent years, provides a certain theoretical basis for the practical application of superconductor bulks.

Key words: High temperature superconductor bulks $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$; Preparation process; Large size; Critical current density

0　引言

自从 1986 年国内外研究者发现高温超导材料以来，便一直是科学家们研究的热门和重点，近年来，又在高温超导材料的薄膜、带材和块材的制备方法和性能方面展开了工作。单畴 REBCO(其中 RE 是稀土元素，即 Y，Gd，Sm，Nd 等) 超导块材系列中由于 $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$(GdBCO) 超导块材具有较大的临界电流密度 J_C、高的临界转变温度 T_C和较强的磁通捕获能力，使得其在超导体磁分离系统、超导储能飞轮、微型强磁体、超导发电机马达和超导磁悬浮列车[1-2]等高新技术领域有着相当大的应用潜力。因此灵活简单的制备方法、低廉的生产成本、高成功率的制备技术等是研究者们一直追求的目标。本文对制备 REBCO 高温超导块材的新型处理工艺进行综述。

1　REBCO 超导块材制备的不同新型处理工艺研究

1.1　籽晶技术方面

1.1.1 籽晶的选择

剑桥大学的 Cardwell 小组利用 Nd-Ba-Cu-Mg-O (Mg-Nd123) [3-7] 籽晶。当比例为 Nd123 + 12mol% Nd422+ xwt% MgO (x = 0.2，0.5，1，2，5，10，20)，用熔融织构的方法成功制备出 Mg 掺杂的 NdBCO，其中最大的晶粒直径为 6mm，能够解理出性能优良 的 Mg-Nd123 籽晶。对这些籽晶进行了差热分析(DTA) 测试表明，当 x>0.5 时，籽晶的最高反应温度为 1100℃，与正常籽晶包晶温度相比，提高了 20℃。因此这种籽晶可以诱导所有的 REBCO 超导块材的生长，被称为通用籽晶。用这种新型的籽晶配合富含 Ba 掺杂成功地制备出了高性能的轻稀土族 LREBCO 超导块材[3,8,9]，如 NdBCO、SmBCO 和 GdBCO，并且实现了 Ag 掺杂的 GdBCO 超导块材的小批量制备[10-11]。另外还使用桥状籽晶准确将籽晶引导的畴区晶界耦合角度控制为 0 度，从而临界电流的输运不会得到衰减。成功地制备出了 25mm 的 YBCO 超导块材[12]。近年来还用 BA-TSIG(Top-seeded Infiltration and growth process，顶部籽晶熔渗生长法) 法制造的两个直径 25mm，高度 10.2mm YBCO 超导块材，即在传统的 TSMG(Top-seeded melt-texture growth process，顶部籽晶熔融织构生长法) 方法生长的块材上添加一个辅助缓冲层[13]。采用 BA-TSIG 技术制造的双样品堆叠 YBCO 超导块材，能够在 28K 时捕获高达 14.3T 的大磁场，这几乎与通过常规 TSMG 法加 Ag 制备的样品捕获的磁场一样大，且十分稳定不易开裂。尽管 TSIG 制备生长的块材与 TSMG 制备生长的块材相比需要额外的氧化时间，但 BA-TSIG 法使得这些样品在微观结构中裂缝密度和缺陷的降低以及临界电流密度有了相应的改善，使得机械和超导特性得以改善。此外，超导块材制备过程中不添加 Ag 元素，也降低了制备的成本。从应用角度来看，有很大的前景。同时 BA-TSIG 技术制造(RE) BCO 超导块材非常可靠，成功率超过 92%。后续又尝试运用 Mg-Nd123 籽晶和 BA-TSIG 技术结合获得了高性能的 GdBCO-Ag 超导块材[14]。说明这两者的结合对实验室和商业生产制造大尺寸的超导块材具有指导意义。

上海交通大学的姚忻小组为了防止籽晶中的 Mg 元素对超导块材造成污染，他们在制备时增加了一个和样品成分相同的小垫片[15-19](直径为 3 mm，厚度约 1.5 mm)，放置在薄膜籽晶和前驱块之间，成功制备出直径为 56 mm 的单畴 GdBCO 超导块材。利用 Nd123/MgO 薄膜籽晶已经逐渐实现 RE(Sm，Nd，Eu，Gd) BCO 超导块材的小批量生产[20-22]。利用液相外延法也成功地制备了 NdBCO 薄膜籽晶，并且诱导生长出了大尺寸的 GdBCO 超导块材[23-27]，但是使用这种方法制备 NdBCO 薄膜籽晶耗时久，成本也比较昂贵。

上海大学的徐克西小组采用 $14mm \times 14mm^2$ 大尺寸的籽晶[28-30]，成功地生长出直径 53 mm 的大尺寸单畴超导块材，同时使用四个 SmBCO 籽晶引

导生长，使得大尺寸 YBCO 块材的生长时间缩短，并且在超导性能上也有所提高。左鹏翔等[31]通过用 Ag 原子降低 SmBCO 坯体熔点，成功地用同质籽晶 SmBCO 制备出了单畴块材 SmBCO 超导体，其超导转变温度达到了 91.4K。

陕西师大的王妙等在基于新固相成功制备 GdBCO 超导块材后，增加一个熔融薄片在 Nd123 籽晶和前驱坯块之间，Nd123 先诱导薄坯块生长 $Gd-Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ 片层结构，形成复合籽晶。称之为顶部籽晶熔融辅助熔渗法（TSMT-IG）[32]。根据 TSMT-IG 制备了增加不同尺寸熔融薄片的单畴 GdBCO 超导块材。熔融薄片能够弥补一定的籽晶缺陷，不易产生随机成核。增加不同尺寸薄片的单畴 GdBCO 超导块材都能成功制备。研究发现，薄片的尺寸增加时样品的磁悬浮力也在增加。不仅如此，薄片的厚度也影响块材的磁悬浮力。熔融薄片厚度为 3 mm，面积为 6 mm × 7 mm 的磁悬浮力达到最大，测量为 28.5 N，其密度为 9.07 N/cm^2。结果说明，增加合适尺寸的熔融薄片在籽晶与前驱坯块之间，能够改善 GdBCO 超导块材的超导性能。

Zhou D 等人[33]使用 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$（Y123）压块作为液相源，用改善的顶部籽晶熔融织构方法生长单畴超导块材 GdBCO，并成功地解决了液相源在最大温度 1100℃时的渗漏问题。在先驱块底部嵌入一个液相源是对顶部籽晶熔融工艺所做的一个简单而重要的改进。结果表明，在没有液相源作为基底的样品中，获得的总场强达到了 0.26T，当厚度超过 2mm 时，磁场就很小了；而加上液相源 Y123 的样品中，捕获的场强在 1.5mm 厚度处就达到了 0.17T，并且随着厚度的增加，场强逐渐变大。可以看出，这种方法对于改善磁通捕获的性能非常有效。

1.1.2 多籽晶技术

与传统的单籽晶引导生长相比，多籽晶技术在大尺寸 YBCO 单畴生长方面更有效。徐克西课题组还利用多籽晶技术成功地生长出直径 53mm 的大尺寸单畴超导块材，同时使用四个 SmBCO 籽晶引导生长，使得大尺寸 YBCO 块材的生长时间缩短，并且在超导性能上也有所提高[34]。磁通捕获场的测量显示多籽晶样品的磁通捕获场比单籽晶样品的峰值更高，均匀性更好。在 77K 零场冷的环境下，多籽晶的磁悬浮力密度可达到 14.6N/cm^2，相比单籽晶的 12.5N/cm^2的磁悬浮力密度有了很大的提高。此外，上海交通大学的姚忻小组还利用薄膜籽晶技术实现了对生长方向的准确控制，得到了 42mm 的 YBCO 多籽晶样品[35]。

日本的 Murakami 小组，采用 Nd123 多个籽晶[36]，引导生长块材。对温控程序进行探索改进，烧结出直径为 62 mm YBCO，但是各个单畴区域不明显。综合以上发现，利用多籽晶生长大尺寸块材，技术不够成熟。既要成功制备大尺寸，也要发挥多籽晶的引导功能。制备性能较高的籽晶对多籽晶技术很有帮助。要让多个籽晶，同时引导的各个畴区生长方向，实现大致相同的连接。研究表明，晶界角度超过 5°，产生的临界电流会大大降低[11]。所以，在制备籽晶时，要控制 a-b 面取向，后期生长的时候，只要对每个籽晶的初始相对位置进行调整，就能使得连接一致。

Deng Z 等[37]把三个籽晶放在(110)面上进行(110)/(110)晶界连接性能的研究。他们用连通率来表征块体里的复层籽晶晶界对电流的流通性，研究发现，晶界处捕获的最大磁场达到了 0.691T（3T），其连通率达到了 57%。虽然有过量的液相与 Y_2BaCuO_5（简写为 Y211）粒子聚集在晶界处，增加了一个正常相的传导阻碍，但它们对于块材的磁通钉扎力和磁悬浮力仍然是有贡献的。不难看出，要想获得一个明显的(110)/(110)晶界，对于籽晶在坯体表面的摆放位置、籽晶间距和生长工艺优化都有严格的要求[38-39]，这些是制备大尺寸单畴超导块材的重要控制条件。Shi 等[40]研究了多籽晶超导体在磁悬浮应用的优点，比较了三种不同籽晶的 YBCO 样品的磁悬浮力。样品 1 是一个单晶的 YBCO 块材，样品 2 是一个多籽晶块材，样品 3 是三个紧密相连的正方形 YBCO 块组，比较了三个样品的磁悬浮力，发现多籽晶的样品的磁悬浮力是最大的。这说明合理的多籽晶的运用有助于大尺寸超导块材的生长，且能够表现出优良的超导性能。多籽晶技术使得制备大尺寸 REBCO 超导块材成为可能，并且可以节省样品制备时间，满足了技术和经济上的需要。

1.2 前驱块处理技术方面

韩国原子能研究院的 Kim 小组在 YBCO 块材熔渗生长时对前驱坯块 Y211 进行了预烧结处理[41,42]。他们将预成型的 Y211 前驱块在 900 ~

1200℃的温度下烧结 2h，结果发现进行烧结过的 Y211 前驱块的直径和厚度都有所减小，坯块的密度增大。使用烧结过的 Y211 前驱块生长 YBCO 超导块材，研究发现随着烧结温度的提高，前驱块的密度增大，样品里残留气孔的数量就越少，捕获到的 Y211 粒子的尺寸也会更小，所以样品具有更高的临界电流密度和更强的磁通捕获能力。

印度 Seshubai 等人发明了预成块优化的熔渗生长工艺[43-45]。他们将尺寸在 400 ~ 1000nm 的 Y211 前驱粉用很高的压力(300 ~ 540MPa)压制成型，发现 460MPa 是最佳的压制压力，制备样品的临界电流密度较高，在 77K 时的不可逆场也在 10T 以上，并且在 6.5T 时的临界电流密度仍有 $10^3 A/cm^2$。

YBCO 或 GdBCO 超导块材的制备难度和带材与薄膜相比是最大的。制备块材的通常方法是熔化法和固相法。而熔化法最常用的方法有 TSMG 和 TSIG 两种，它能克服固相法中杂相在晶界上形成的“弱连接”，从而提高超导块材的临界电流密度 J_C 的大小[46]。然而用 TSMG 法制备的 YBCO 块材，由于在生长过程中的转变温区较窄，生长速率慢，而且块体在生长过程中处于半熔融状态，钡、铜、氧液相极易流失，造成成分偏析，Ba 与 Cu 严重缺乏造成超导块材难以生长。另外，YBCO 块体生长温度会随炉温产生波动，新 YBCO 生长前沿的随机成核也会使单畴织构体生长停止。席少波等人[47]采用 TSIG 法，在原始块材底部加入 $Yb_{1.8}$ 和侧面包覆 $Yb_{1.8}$ 粉体，发现液相流失现象被有效控制，随机形核被抑制，并生长出单一的 YBCO 块材。$Yb_{1.8}$ 衬底的这种组装方式不仅有效阻止了液相流失，而且在下表面形成了较为均匀的温度场，极大地改善了在降温过程中引起的温场不均匀状况，并抑制了样品底部的随机形核，这就迫使样品只能从上表面开始，自上而下生长[48]。

李国政[49]采用一种新的装配方式制备超导块材。将等直径的固相块和液相块改进为不等直径(液相块直径大于固相块的直径)的坯块，进行装配并成功地生长了单畴超导块材。该方法可以提高液相源块的支撑能力，有效避免样品出现倾斜或倒塌的现象，从而提高了溶渗生长方法的稳定性。此外，由于液相源块的直径始终大于其上的样品，可以保证在生长过程中样品的整个底部始终与液相源直接接触，因此可为样品的完整生长提供充足的液相条件。研究表明，由新型装配方式制备的样品表现出比较高的超导转变温度(约 91K)和自场临界电流密度($4.7\times10^4 A/cm^2$)。李国政还以 $Gd_2O_3+xBaCuO_2$(其中 x = 1.0，1.2，1.4，1.6，1.8，2.0，2.2，2.5)配制固相源代替传统的 Gd_2BaCuO_5(简写为 Gd211)固相源，采用 TSIG 方法制备了多个 GdBCO 超导块材，分析并研究了这些样品的宏观形态、微观结构和磁悬浮力。结果表明: 当新固相源中 $BaCuO_2$ 的含量在 1.0 ~ 2.5 之间，单畴 GdBCO 超导块材都能够成功生长; 样品的磁悬浮力随着 x 增加呈现先上升后下降的趋势，其中 x = 1.8 的样品，磁悬浮力达到最大值 33N。

Murakami 等人[50]为了制造更大尺寸的(Gd，Dy)BCO(80wt% Gd_2BaCuO_5 和 20wt% Dy_2BaCuO_5)单畴超导体，采用不同的液相[LP = $ErBa_2Cu_3O_{7-\delta}$(简写为 Er123)与 $Ba_3Cu_5O_8$(简写为 035)]混合，并且通过改变质量来优化 LP 含量。Er123 + 035 质量的增加确保了包晶反应所需的大量液体。发现 1:1.4的 Er123 和 035 比率是最佳的。77K 下的捕获场为 0.22T，说明优化的液相渗透可有效控制 $(Gd,Dy)_2BaCuO_5$(211)第二相的大小和最终微结构中的含量，从而改善超导性能。

白云强等人[51]利用快速凝胶分解法制备的纳米粉体作为前驱粉，采用 TSMG 生长了单畴 SmBaCuO 超导块材，并研究了相应超导块材的超导性能。研究发现，采用纳米前驱粉 TSMG 方法制备块材的等温生长温区比较窄，块材中不易形成大尺寸(1 ~ 10μm)的 Sm_2BaCuO_5(简写为 Sm211)颗粒，降低了磁通钉扎中心的尺寸，改善了超导块材的性能。但是纳米粉体化学活性强，数量少的 Sm 211 浓度就会导致 Sm 和 Ba 的替代明显地抑制超导电性，从而块材的超导性能就会有所下降。

Gregory P L 等人[52]通过在坯体上钻一些小圆孔，然后在不同直径的孔里填装软铁磁材料，Sample A 直径约为 0.8mm，Sample B 直径约为0.35mm。经过 TSMG 方法生长出超导块材，来提高块材的磁通捕获性能，同样获得了成功。如表 1:

表 1 A、B 样品捕捉磁场性能比较[51]

Table1 A, B Sample magnetic field capture performance comparison[51]

	Sample A		Sample B	
	No ferro(mT)	Ferro(mT)	No ferro(mT)	Ferro(mT)
Top surface	303	406	209	244

可以看出,在未填料的 A、B 两个块体中,A 的捕获磁场比 B 样品大很多,这可能是因为大孔直径使氧气更容易在块体中扩散,减少了宏观裂纹,改善了超导体的性能。总之,通过在块体上打孔,为提高块材的超导性能提供了一个简便方法。

Cakir B 等人[53] 通过使用 Nd123 籽晶,用 TSMG 方法制备掺杂银的 YBCO 超导块材。有效地将具有不同添加量的 Y211(分别为 20 wt% 和 30 wt%) 和 Y123 焊料材料相互焊接。研究发现: 焊料材料与样品之间获得了连续的结构相,并且具有良好的结合度,没有任何边界缺陷。在超导起始温度以下电阻急剧下降,并且在 0 磁场下,跃迁宽度(ΔTc) 与介电常数相比窄,在 2.23 – 2.61K 范围内。此外,所有样品 ΔTc 值都彼此接近,表明添加的 Ag 具有良好的金属性能,且传输通道更佳。

Shi 等人[54] 使用 20、32 和 55g 混合前驱粉末通过 TSMG 工艺,制造了三个直径为 16、20 和 25mm 的 YBCO 单畴块材。处理后的样品标记为样品 1、样品 2 和样品 3。样品 1 的厚度为 5.79mm(H / R: 0.72,其中,H 为样品厚度,R 为样品半径,H / R 为其纵横比) ,样品 2 的厚度为 8.16mm(H / R: 0.82) ,样品 3 的厚度为 11.34mm(H / R: 0.91) 。通过测量发现纵横比 H / R 越小的样品临界电流密度越大。可以推测如果将某一样品进行堆叠放置,就能够获得更高的捕获场,即其超导性能会得到改善。

1.3 渗氧技术方面

斯洛伐克的 Diko 等人采用高压渗氧技术[55,56] 。通常下 REBCO 超导块材的渗氧处理都是在流动的氧气中,500 ~ 530℃ 左右的温度范围内进行保温或慢降温完成的,一般需要比较长的一个处理时间(基本按照块材的尺寸而定) 。此外氧气的扩散进入会在块材中引发张应力,会导致渗氧微裂纹的出现,这对样品的超导性能是不利的。Diko 等人采用 16MPa 的高氧压在 750℃ 的温度下保温 24h 完成了 YBCO 块材的渗氧处理,这与原来的技术需要的时间相比,有了明显的减少,大大提高了制备的效率,而且高压氧气还可以对块材微裂纹进行抑制,这样就提高了样品的临界电流密度。对于大尺寸的 REBCO 超导块材的制备,高压渗氧技术是最为理想有效的后期处理工艺。

M Oda 运用 SmBCO/MgO 薄膜籽晶,结合低压氧技术成功地生长出直径达 30mm 的 SmBCO 和 GdBCO 超导块材[57] 。研究者利用冷籽晶扩大了稳定生长的处理窗口,块材的超导转变宽度变大,对块材的生长环境与之前不同的是,在 300ml/min 的 Ar 气氛和 500ml/min 的 1% O_2 和 99% Ar 气氛中进行。成功地生长了超导块材并测得冷籽晶制备的块材的捕获场最大为 1.52T。即使在减少的氧气气氛中,也可以通过使用薄膜作为籽晶的冷籽晶方法成功地生长出高质量的超导体。而且冷籽晶法比热籽晶法更加容易,这次研究的结果将有助于简化大尺寸超导块材的生产过程。

2 结论

REBCO 超导材料的制备工艺已经得到了快速地发展,材料新的应用不断被研究人员开发着。据报道,REBCO 超导材料被认为未来最有应用前景的材料之一。然而,稀土元素的高价位,块材的尺寸和形状设计仍然是商业化生产的最大障碍。从改善传热效率或者用材料学理论方法加强磁通钉扎性能来阻止在交流过程中磁通蠕动所产生的热量被认为是一个可行的研究方法。但是不管怎样,开发 REBCO 块材的新应用仍然是研究人员最重要的工作。

参考文献:

[1] Zhou D F, Izumi M, Miki M, et al. An overview of rotating machine systems with high-temperature bulk superconductors [J]. Supercond. Sci. Technol., 2012, 25: 103001.

[2] Werfel F, Floegel-delor U, Rothfeld R, et al. Superconductor bearings, flywheels and transportation [J]. Supercond. Sci. Technol., 2012, 25: 014007.

[3] Shi Y, Hari Babu N, Iida K, Cardwell D A. Mg-doped Nd-Ba-Cu-O generic seed crystals for the top-seeded

melt growth of large-grain (rare earth)-Ba-Cu-O bulk superconductors [J]. J. Mater. Res., 2006, 21: 1355—1362.

[4] Shi Y, Hari Babu N, Cardwell D A. Development of a generic seed crystal for the fabrication of large grain (RE)-Ba-Cu-O bulk superconductors [J]. Supercond. Sci. Technol., 2005, 18: L13-L16.

[5] Hari Babu N, Shi Y, Iida K, Cardwell D A. A practical route for the fabrication of large single-crystal (RE)-Ba-Cu-O superconductors [J]. Nat. Mater., 2005, 4: 476-480.

[6] Shi Y, Hari Babu N, Iida K, Cardwell D A. Properties of Mg-doped Nd-Ba-Cu-O generic seed crystals for the top seeded melt growth of (RE)-Ba-Cu-O bulk superconductors [J]. J. Phys.: Conf. Ser., 2006, 43: 446-449.

[7] Shi Y, Hari Babu N, Iida K, Cardwell D A. The influence of Nd-Ba-Cu-Mg-O generic seed crystal composition on Tc of seeded, bulk (RE)-Ba-Cu-O grains [J]. Physica C, 2006, 445-448: 295-298.

[8] Cardwell D A, Hari Babu N, Shi Y, Iida K. A practical processing method for the fabrication of high performance, single grain (LRE)-Ba-Cu-O superconductors [J]. Supercond. Sci. Technol., 2006, 19: S510-16.

[9] Hari Babu N, Iida K, Shi Y, Cardwell D A. Processing of high performance (LRE)-Ba-Cu-O large, single-grain bulk superconductors in air [J]. Physica C, 2006, 445-448: 286-290.

[10] Shi Y, Hari Babu N, Iida K, Yeoh W K, Pathak S K, Dennis A R, Cardwell D A. Batch-processed GdBCO-Ag bulk superconductors fabricated using generic seeds with high trapped fields [J]. Physica C, 2010, 470: 685-688.

[11] Shi Y, Durrell J, Dennis A, Hari Babu N, Mancini C andCardwell D. Multiple seeding for the growth of bulk Gd-BCO - Ag superconductors with single grain behaviour [J]. Supercond. Sci. Technol., 2012, 25: 045006.

[12] Namburi D, Durrell J, Jaroszynski J, Shi Y, Ainslie M, Huang K, Dennis A, Hellstrom E and Cardwell D A. A trapped field of 14.3 T in Y - Ba - Cu - O bulk superconductors fabricated by buffer-assisted seeded infiltration and growth [J]. Supercond. Sci. Technol., 2018, 31: 125004.

[13] Namburi D, Durrell J, Jaroszynski J, Shi Y, Ainslie M, Huang K, Dennis A, Hellstrom E, Cardwell D A. A trapped field of 14.3 T in Y - Ba - Cu - O bulk superconductors fabricated by buffer-assisted seeded infiltration and growth [J]. Supercond. Sci. Technol., 2018, 31: 125004.

[14] Namburi D, Shi Y, Dennis A, Durrell J, Cardwell D A. A robust seeding technique for the growth of single grain (RE) BCO and (RE) BCO - Ag bulk superconductors [J]. Supercond. Sci. Technol., 2018, 31: 044003.

[15] Tang C Y, Yao X, Hu J, Rao Q L, Li Y R, Tao B W. YBCO melt-textured growth seeded by superheating YBCO/MgO thin film [J]. Supercond. Sci. Technol., 2005, 18: L31-L34

[16] Sun L J. Research on Orientation Epitaxy and Microstructure Control of High Temperature Superconducting Bulk Materials [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.

[17] Hu J, Yao X, Rao Q L. Real-time observation of the melting process of YBCO thin film on MgO substrate [J]. J. Phys.: Condens. Matter, 2003, 15: 7149-7154.

[18] Yao X, Hu J, Izumi T, Shiohara Y. Direct evidence and the mechanism of superheating in YBCO thin film [J]. J. Phys.: Condens. Matter, 2004, 16: 3819-3826.

[19] Li T Y, Cheng L, Yan S B, Sun L J, Yao X, Yoshida Y, Ikuta H. Growth and superconductivity of REBCO bulk processed by a seed/buffer layer/precursor construction [J]. Supercond. Sci. Technol., 2010, 23: 125002 (4pp).

[20] Cheng L, Li T Y, Yan S B, Sun L J, Yao X, Puzniak R. Large size and high performance of a Gd-Ba-Cu-O bulk superconductor grown using new approaches [J]. J. Am. Ceram. Soc., 2011, 94: 3139-3143.

[21] Muralidhar M, Tomita M, Suzuki K, Jirsa M, Fukumoto Y, Ishihara A. A low-cost batch process for high-performance melt-textured GdBaCuO pellets [J]. Supercond. Sci. Technol., 2010, 23: 045033 (7pp).

[22] Muralidhar M, Tomita M, Suzuki K, Fukumoto Y. Novel seed for batch cold seeding production of GdBaCuO bulks [J]. Physica C, 2010, 470: 1158-1163.

[23] Li T Y, Wang C L, Sun L J, Yan S B, Cheng L, Yao X, Xiong J, Tao B W, Feng J Q, Xu X Y, Li C S and Cardwell D A. J. Multiseeded melt growth of bulk Y - Ba - Cu - O using thin film seeds [J]. Appl. Phys., 2010, 108(2): 023914.

[24] Xu H H, Chen Y Y, Cheng L, et al. YBCO-buffered NdBCO film with higher thermal stability in seeding REBCO growth [J]. Supercond. Sci. Teclmol., 2012, 25: 035014.

[25] Xu H H, Cheng L, Yan S B, et al. Recycling failed bulk YBCO superconductors using the NdBCO/YBCO/MgO film

-seeded top-seeded melt growth method [J]. J Appl. Phys., 2012, 111: 103910.

[26] Xu H H, Chen Y Y, Cheng L, et al. YBCO-Buffered NdBCO film with higher thermal stability in seeding REBCO growth and recycling failed bulk YBCO superconductors [J]. J. Supercond. Novel. Magn., 2013, 26(4): 919-922.

[27] Yu D J, Clieng L, Peng B N, et al. Two-layer batch-processof $YBa_2Cu_3O_x$ bulk superconductors induced by Nd-$Ba_2Cu_3O_x$ film-seeds [J]. J Appl. Phys., 2013, 113: 203914

[28] Wu X D, Xu K X, Pan P J. Study on single domain growth of Ag-doped Sm-Ba-Cu-O bulk using cold seeding technique [J]. Physica C, 2009, 469: 225-229.

[29] Wu X D, Xu K X, Pan P J. Growth and investigation of SmBCO/Ag single grain bulk for batch production of Sm123 seed crystals [J]. Physica C, 2009, 469: 1906-1909.

[30] Wu X D, Xu K X, Fang H, Jiao Y L, Xiao L, Zheng M H. A new seeding approach to the melt texture growth of a large YBCO single domain with diameter above53mm [J]. Supercond. Sci. Technol., 2009, 22: 125003 (6pp).

[31] Zuo P X, Xu K X, Lian B W. et al. Research on SmBCO / Ag Superconducting single domain bulk material grown by homogeneous cold seed technology [J]. Journal of Low Temperature Physics, 2012,34(2):138-141.

[32] Wang M, Yang W M, Yang P T, Li J W. Preparation of high-performance single-domain GdBCO superconducting bulk material using top seed crystal melting-assisted infiltration [J]. Science in China: Physics Mechanics Astronomy, 2014, 44(09):907-912.

[33] Zhou D, Hara S, Li B, et al. Significant improvement of trapped flux in bulk GdBaCuO grains fabricated by a modified top-seeded melt growth process [J]. Supercond. Sci. Tech., 2013, 26:015003.

[34] Cao Y, Wu X D, Hu S B, Tang T W, Xu K X. Research on Growth of Large-sized YBCO Single Domain superconducting bulk Material by multi-seed technology [J]. Journal of Low Temperature Physics, 2013, 35(03): 161-166.

[35] Muralidhar M, Suzuki K, Fukumoto Y, Ishihara A, Tomita M. High performance batch production of $LREBa_2CuO_y$ using novel thin film Nd-123 seed [J]. Physica C, 2011,471: 834-839.

[36] Wongsatanawarid A, Seki H and Murakami M, Growth of large bulk Y-Ba-Cu-O with multi-seeding [J]. Supercond. Sci. Technol., 2010, 23(4): 045022.

[37] Deng Z, Miki M, Felder B. et al. Gap-related trapped magnetic flux dependence between single and combined bulk superconductors [J]. Physica C, 2011, 471(9): 314-317.

[38] Jooss C, Bringman B, Delmare M P. et al. Current distributions of grain boundaries in differently processed melt textured $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [J]. Supercond. Sci. Technol., 2001, 14(5): 260.

[39] Li G Z, Yang W M. et al. Preparation of single-domain GdBCO superconducting bulk material from a new composition liquid source using top seed crystal infiltration growth process [J]. Acta Physics sinica, 2010, 59(7): 5028-5032.

[40] Shi Y, Dennis A, Huang K Y, Zhou D F, Durrell J and Cardwell D A. Advantages of multi-seeded (RE)-Ba-Cu-O superconductors for magnetic levitation applications [J]. Supercond. Sci. Technol., 2018, 31: 095008 (9pp)

[41] Mahmood A, Jun B H, Han Y H, Kim C J. Effective porecontrol and critical current density in liquid infiltration growth processed Y-123 superconductors with Ag addition [J]. Supercond. Sci. Technol., 2010, 23: 065005 (7pp).

[42] Mahmood A, Jun B H, Park H W, Kim C J. Pre-sintering effects on the critical current density of YBCO bulk prepared by infiltration method [J]. Physica C, 2008, 468: 1350-1354.

[43] Devendra Kumar N, Rajasekharan T, Muraleedharan K, Banerjee A, Seshubai V. Unprecedented current density to high fields in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconductor through nano-defects generated by preform optimization in infiltration growth process [J]. Supercond. Sci. Technol., 2010, 23: 105020 (8pp).

[44] Devendra Kumar N, Rajasekharan T, Gundakaram R C, Seshubai V. Extensive nanotwinning: origin of high current density to high fields in preform-optimized infiltration-growth-processed $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconductor [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, 21:3612-3620.

[45] Devendra Kumar N, Rajasekharan T, Seshubai V. YBCO/Ag composites through a perform optimized infiltration and growth process yield high current densities [J]. Supercond. Sci. Technol., 2011, 24: 085005 (11pp).

[46] Wang X D, Xu H, Xiang F. et al. YBCO bulk development status [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 40(06): 31-35.

[47] Xi S B, Yang W M, Pei J L. et al. Effect of $Yb_{1.8}$ addition on the growth of YBCO single-domain superconductor

[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S4): 181-184.

[48] Zhang C P, Xu X Y. et al. Single-layer YBCO superconducting bulk material prepared by layer seed crystals [J]. Journal of Low Temperature Physics, 2009, 31(4): 301-305.

[49] Li G Z. Development and application of single domain Gd-BCO superconducting bulk materials [D]. Shanxi Normal University, 2012.

[50] Naik S, Muralidhar M, Takemura K, Jirsa M, Murakami M. Infiltration growth processing of single grain (Gd,Dy)BCO bulk superconductors: Optimization of liquid phase mass and characterization of physical properties [J]. J. Appl. Phys. 2019, 125: 093907.

[51] Bai Y Q, Zhang H, Kan X, Pu M H, Zhao Y. Preparation of Sm-Ba-Cu-O single-domain superconducting bulk material based on nano-precursor powder and its superconducting properties [J]. Journal of Low Temperature Physics, 2008(04): 288-292.

[52] Gregory P L, Fagnard J F, Chaud X, et al. Magnetic properties of drilled bulk high temperature superconductors filled with a ferromagnetic powder [J]. Supercond. Sci. Technol., 2011, 24(3): 5008.

[53] Cakir B, Ozturk K, Guner S, Celik S, Aydiner A. Magnetic properties of the welded joined TSMG Y123+xwt% Y211 (x=20 and 30) bulk superconductors [J]. Physica C: Superconductivity and its applications, 2019, 557: 19-25.

[54] Shi Y, Dennis A, Durrell J, Cardwell D A. The effect of size and aspect ratio on the trapped field properties of single grain, Y-Ba-Cu-O bulk superconductors [J]. Supercond. Sci. Technol., 2019, 32: 025005 (10pp).

[55] Diko P, Chaud X, Antal V, Kanuchov M, Sefcikov M, Kovac J. Elimination of oxygenation cracks in top-seeded melt-growth YBCO superconductors by high pressure oxygenation [J]. Supercond. Sci. Technol., 2008, 21: 115008 (3pp).

[56] Diko P, Antal V, Zmorayov K, Sefcikov M, Chaud X, Kovac J, Yao X, Chen I, Eisterer M, Weber H W. The influence of post-growth thermal treatments on the critical current density of TSMG YBCO bulk superconductors [J]. Supercond. Sci. Technol., 2010, 23: 124002 (7pp).

[57] Oda M, Yao X, Yoshida Y, Ikuta H. Melt-textured growth of (LRE)-Ba-Cu-O by a cold-seeding method using $SmBa_2Cu_3Oy$ thin film as a seed [J]. Supercond. Sci. Technol., 2009, 22: 075012.