

热中子辐照提高掺硼 YBaCuO 超导体 J_c 的研究*

李际周 刘蕴韬 肖红文

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京, 102413)

任洪涛 肖玲 焦玉磊

(北京有色金属研究总院, 北京, 100088)

掺杂天然硼的熔融织构生长 (Melt-textured Growth) 的 $YB_xBa_2Cu_3O_y$ ($x = 0.015, 0.035$) 超导体经注量为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 的热中子辐照后, 磁临界电流密度 J_c 增至 3.8 倍。 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}^+{}^7\text{Li}^+$ ($Q = +2.79 \text{ MeV}$) 核反应出射的高能粒子能在超导体中产生均匀分布的、可以作为磁通钉扎中心的辐照损伤, 以便提高 J_c 。掺硼超导体热中子辐照后放射性副产物的半衰期较短, 剂量较小, 使得这项技术很有应用前景。

关键词 热中子辐照 掺硼 YBaCuO 超导体 临界电流密度

中图法分类号 O 571.421 TM 264

中子辐照已经被证明是一种能够在高 T_c 超导体中产生可以作为磁通钉扎中心的辐照损伤, 以便提高磁临界电流密度 J_c 。快中子辐照可使 J_c 提高 10 倍多^[1], 但有 2 个缺点: 1) 一般核反应堆石墨反射层中的热快比高达 500 : 1, 重水反射层中的热快比为 60 : 1, 因此, 要使快中子达到一定注量, 必须照射很长时间, 而大量的热中子不仅不能利用, 而且还要用镉片屏蔽掉; 2) 长时间的照射生成了大量的放射性副产物, 使辐照后的材料难以处理。采用热中子辐照来提高 J_c 将更实用。热中子本身如果没有核反应, 仅靠散射不能产生足够大的辐照损伤, 因此 J_c 的提高是有限的, 系统研究见文献[2], 最高增量只有 2.3 倍。利用热中子的裂变反应和放热反应可以收到良好的效果。在烧结 YBaCuO 样品时掺入 10^{-4} 量级的天然铀, 然后用热中子辐照, ^{235}U 俘获 1 个热中子后发生裂变, 高能裂变碎片在超导体中的射程可达 $16 \mu\text{m}$, 形成非常大的辐照损伤, 从而大大提高 J_c , 最高可达 20 倍^[3]。但铀本身和裂变碎片都是放射性物质, 这给材料的进一步处理带来困难。热中子放热反应可以采用



其反应产物 ${}^3\text{H}$ 和 ${}^4\text{He}$ 在超导体中的最大射程分别约为 $21 \mu\text{m}$ 和 $4 \mu\text{m}$, 与裂变碎片的损伤范围

* 核工业科学基金资助项目

李际周: 男, 56 岁, 中子散射专业, 研究员

收稿日期: 1997-10-22 收到修改稿日期: 1997-11-20

相当。掺入 3% ^6Li 于钇位的高 T_c YBaCuO 烧结超导体经注量为 10^{18} cm^{-2} 的热中子辐照后, J_c 最高可以提高到 25 倍^[4]。对于另一个热中子放热反应 $^{10}\text{B}(n, ^4\text{He})^7\text{Li}$; $^7\text{Li}^+$ ($Q = 2.79 \text{ MeV}$) 首先要解决的问题是如何把硼掺入而又不影响高温超导体 YBaCuO 的 T_c 和 J_c , 然后用热中子辐照, 探索最佳掺入量和热中子注量等实验条件。

1 实验

1.1 样品制备^[5]

高纯 BaCO_3 、 Y_2O_3 、 CuO 与 H_3BO_3 粉按照 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 组分混合, 天然硼的掺杂量分别为 $x = 0.015$ 和 0.035 , 使用改进的熔融织构生长工艺进行晶体生长^[6]。在 $450 \sim 500$ 的氧气气氛中对样品进行 $80 \sim 100 \text{ h}$ 的后处理, 用交流磁化率法测量了不同掺硼量样品的临界转变温度 T_c , 结果表明: 在此 x 量范围内, 超导临界温度 T_c 下降幅度不大, 在 1 K 以内。

1.2 热中子辐照

掺硼熔融织构生长的 YBaCuO 超导样品的热中子辐照是在中国原子能科学研究院重水反应堆的垂直孔道 No. 12 中进行的。孔道 No. 12 在重水反射层中, 两边的垂直孔道一般不安排 ^{60}Co 的照射, 其热快比为 $60:1$, 重水温度为 60 左右。单位功率的中子注量率为 $4.6 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{W}^{-1}$, 日常堆功率为 7 MW , 累计 4.5 h , 中子注量为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 。

1.3 J_c 增量测量

掺硼 YBaCuO 熔融织构生长的超导样品在热中子辐照前、后用移动样品磁强计 LDJ 9500 V SM 装置测量其磁滞回线, 测试温度为 77 K , 提供的磁场方向与织构样品 c 轴方向平行, 磁场从 -2 T 到 $+2 \text{ T}$ 变化。辐照前, 根据磁滞回线采用改进型 Bean 临界态模型公式^[1]可以推算出磁化临界电流密度 J_c 。根据文献[5]的研究, 适量掺杂硼能够提高样品的 J_c , 并改善 J_c 与磁场的关系, J_c 增量最高可达 2 倍, 在 77 K 、 2 T 下 J_c 达到 $4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 。根据透射电镜观察, J_c 增量是因为掺杂硼后, 在 123 基体中发现了一些新的析出相, 析出相类型有 2 种: 一种尺寸小于 5 nm , 分区域集中分布, 在其周围有密集的位错网; 另一种尺寸约 50 nm , 为球对称畸变颗粒, 在其周围的 123 相内产生“蝴蝶状”应变场。这些新析出相颗粒及其周围的缺陷可以作为磁通钉扎中心, 以便提高 J_c 和改善与磁场的关系。

2 结果与讨论

掺硼熔融织构生长的 YBaCuO 超导样品经注量为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 的热中子辐照后, 磁化临界电流密度都明显增加, 其增量在 2 倍以上, 以 $\text{YB}_{0.035}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 为例, 其 J_c 增至 3.8 倍。它的辐照前后磁滞回线的比较示于图 1。

在掺硼熔融织构生长的 YBaCuO 超导样品热中子辐照实验中, 用不掺硼的样品作对比, 结果不掺硼的 YBaCuO 样品的 J_c 提高甚微, 这表明 J_c 增加是由于 ^{10}B 的热中子放热反应所致。 ^{10}B 反应与 ^6Li 反应一样, 由于热中子能量很小 (约 0.025 eV), 反应后两种产物的能量几乎完全由 Q 值带来,



两种反应产物在超导体中的最大射程的总和大约为 $4 \mu\text{m}$, 这与 ^6Li 反应造成的缺陷范围相近, 但比快中子散射造成的缺陷大得多, 足以作为钉扎中心以便提高 J_c 。

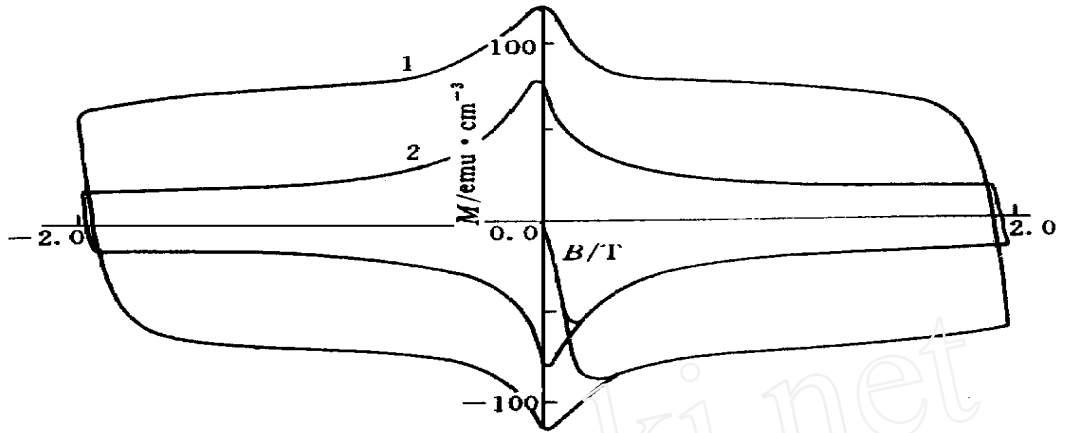


图1 YB_{0.035}Ba₂Cu₃O₇ 经注量为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 热中子辐照前后磁滞回线的比较

Fig. 1 Comparison of hysteresis loops of the irradiated and unirradiated YB_{0.035}Ba₂Cu₃O₇ sample with the fluence of $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

磁场方向与结构样品 c 轴方向平行, 温度为 77 K

1——辐照前; 2——辐照后

掺少量天然硼, 用热中子辐照后, 其剩余放射性性与 YBaCuO 相同, 没有增加新的长半衰期放射性。冷却 3 个月后, 剩余放射性性主要来自 $^{132}\text{Ba} + n \rightarrow ^{133}\text{Ba}$ ($T_{1/2} = 10.54 \text{ a}$)。在天然钡中, ^{132}Ba 含量很少 (0.101 %), 产生的放射性强度在允许剂量范围内。

样品中不能掺银, 因为 ^{109}Ag 的天然丰度为 48.16 %, $^{109}\text{Ag} + n \rightarrow ^{110}\text{Ag}^m$ ($T_{1/2} = 250 \text{ d}$) 反应生成的放射性很强。另外也不能掺杂 Gd, 因为 $^{152}\text{Gd} + n \rightarrow ^{153}\text{Gd}$ ($T_{1/2} = 241.6 \text{ d}$) 反应生成的放射性也较强。虽然 ^{152}Gd 的天然丰度只有 0.20 %, 但是此反应截面高达 $1.1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 。

以上 J_c 增加的结果只是初步实验, 掺硼量和热中子注量等最佳条件的探索正在进行中, 掺浓缩 ^{10}B 的实验也在考虑中, 预期 J_c 增量高达 10 倍是可以实现的。

参 考 文 献

- 1 Ren Hongtao, Xiao Ling, He Qing, et al. The Effect of the Neutron Irradiation on the Critical Current and the Microstructure of Melt-textured Growth YBa₂Cu₃O₇. Modern Physics Letters B, 1991, 5: 1213
- 2 李际周, 康健, 肖玲, 等. 热中子辐照提高 YBCO 和 GdBCO 超导材料 J_c 的研究. 原子能科学技术, 1993, 27: 527
- 3 Fleischer RL, Hart HR, Lay KW Jr, et al. Increased Flux Pinning Upon Thermal Neutron Irradiation of Uranium-doped YBa₂Cu₃O₇. Physical Review B, 1989, 40: 2163
- 4 Zhao YJ, Liu JR, Meng RL, et al. Thermal Neutron Irradiation of Li Doped YBa₂Cu₃O₇ and Flux Pinning Enhancement. Physica C, 1992, 198: 256
- 5 焦玉磊, 任洪涛, 肖玲, 等. 掺硼熔融织构 YBa₂Cu₃O₇ 样品的磁化特性及微观结构. 低温物理学报, 1995, 17(增刊): 258
- 6 Ren Hongtao, He Qing, Xiao Ling, et al. The Synthesis and the Measurement of High J_c YBa₂Cu₃O₇ Superconductor by Melt-textured Growth Method. Cryogenics, 1990, 30: 837

CRITICAL CURRENT ENHANCEMENT OF B DOPED YBaCuO BY THERMAL NEUTRON IRRADIATION

Li Jizhou Liu Yuntao Xiao Hongwen

(China Institute of Atomic Energy, P.O.Box 275-30, Beijing, 102413)

Ren Hongtao Xiao Ling Jiao Yulei

(General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing, 100088)

ABSTRACT

Up to 3.8 times enhancement of magnetic critical current density has been observed for boron-doped melt-textured growth superconductors $YB_xBa_2Cu_3O_y$ ($x = 0.015, 0.035$) irradiated with thermal neutron fluences of $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. According to the nuclear reaction $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, $^7\text{Li}^*$ ($Q = +2.79 \text{ MeV}$), the energetic reaction-produced charged particles α and ^7Li or $^7\text{Li}^*$ can create uniformly distributed radiation damage as magnetic flux pinning centers. The short life and small dose of the radioactive by-products of the thermal neutron irradiation make this technique quite feasible for practical applications.

Key words Thermal neutron irradiation B doped YBaCuO superconductor Critical current density