

# 柠檬酸掺杂的 $MgB_2$ 超导体钉扎机理的研究\*

孙辉辉<sup>1)</sup> 杨 焯<sup>1)†</sup> 王 磊<sup>1)</sup> C. H. Cheng<sup>2)</sup> 冯 勇<sup>3)</sup> 赵 勇<sup>1)2)</sup>

1) (西南交通大学材料先进技术教育部重点实验室, 超导研究开发中心, 成都 610031)

2) (School of Materials, University of New South Wales, Sydney 2052, NSW Australia)

3) (西北有色金属研究院, 西部超导科技公司, 西安 710016)

(2009 年 7 月 15 日收到; 2009 年 9 月 8 日收到修改稿)

本文研究了柠檬酸掺杂的  $MgB_2$  超导材料的  $J_c$ - $B$  行为及其钉扎机理. 在纯  $MgB_2$  多晶样品中,  $\delta T_c$  钉扎起主要作用, 而在掺杂的样品中, 则是  $\delta l$  钉扎和  $\delta T_c$  钉扎共同作用, 并且  $\delta l$  钉扎机理占主要作用, 其贡献比重随着掺杂量的增加而增加. 从  $J_c$ - $B$  行为和钉扎行为的分析都可以得到, 柠檬酸掺杂量为 15% 的  $MgB_2$  超导材料表现出最好的性能.

关键词: 柠檬酸,  $MgB_2$ ,  $\delta T_c$  钉扎,  $\delta l$  钉扎

PACC: 7476G, 7470D, 8230H, 7490

## 1. 引 言

自 2001 年  $MgB_2$  材料的超导电性被发现以来<sup>[1]</sup>, 在全世界范围内掀起了研究  $MgB_2$  超导体的热潮, 人们先后对该材料的物理机理进行了大量的实验和理论研究<sup>[2-4]</sup>. 研究人员制备了多种  $MgB_2$  材料用以研究其超导性能和磁通钉扎特性, 包括单晶、薄膜、多晶和线带材等<sup>[5-9]</sup>. 在  $MgB_2$  的超导电性被发现的初期, 虽然自场下  $MgB_2$  有较高的临界电流密度, 但由于缺少有效的钉扎中心, 临界电流密度值随外场增加而快速衰减. 化学掺杂是改善  $MgB_2$  钉扎行为的有效方法, 其中 C 掺杂可以明显提高  $MgB_2$  在高场下的表现, 其临界电流密度相对于 2001 年的结果已经提高了 1—2 个数量级<sup>[10-13]</sup>. 然而,  $MgB_2$  超导体的钉扎机理还未完全清楚. 钉扎性能是决定第二类超导体临界电流密度的关键因素, 因此研究  $MgB_2$  超导材料的钉扎性能具有重要意义. 第二类超导体处于混合态时, 磁通线由正常芯和环绕它的超导电流所构成, 其中正常芯的尺寸为相干长度  $2\xi$ , 环绕电流的延伸范围大约为磁场的穿透深度  $\lambda$ . 由 G-L 理论可知, 混合态单位体积的自

由能可以写成

$$G_s = G_n + \alpha |\psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\psi|^4 + \frac{1}{2m^*} |-ih\Delta\psi - 2eA|^2 + \frac{B^2}{2\mu_0} - B \cdot H, (1)$$

其中  $G_n$  是正常态下的自由能,  $\alpha$  和  $\beta$  是和温度相关的参量,  $\alpha \approx \alpha_0(T - T_c)$ . 上式第二项及第三项是和超导转变温度相关的超导态凝聚能项, 正常芯中这两项为零. 但在超导体中, 由于材料的不均匀性造成超导转变温度  $T_c$  的涨落, 当磁通芯子正好处于正常区或超导转变温度较低的区域时, 体系的总能量最低, 从而对磁通线起到钉扎作用, 这类钉扎称为  $\delta T_c$  钉扎. 另一方面, 上式中第四项是环绕正常芯子超导电流的动能项, 其大小和电子运动的平均自由程关系密切, 在超导体中缺陷的分布导致电子运动的平均自由程的空间涨落, 从而起到钉扎作用, 这种钉扎被称为  $\delta l$  钉扎. Qin 等人<sup>[14]</sup> 利用集体钉扎理论对  $MgB_2$  超导体的钉扎行为进行了分析, 研究了集体钉扎中单钉扎区域和小集体钉扎区域的分界磁场,  $B_{sb}(T)$ , 随温度变化的行为. 发现在纯  $MgB_2$  体系中, 其钉扎行为主要是  $\delta T_c$  钉扎. Wang 等人<sup>[15]</sup> 研究了不同条件下制备的 C 掺杂  $MgB_2$  体系的钉扎

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50588201, 50672078, 50872116), 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200806130023), 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (批准号: 2007CB616906), 澳大利亚研究委员会基金 (批准号: DP0559872, DP0881739), 西南交通大学博士生创新基金, 西南交通大学科技发展基金, 西南交通大学科技创新基金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yeyang@swjtu.edu.cn

行为,发现掺杂 C 可在体系中引入更多的点缺陷,从而引起样品中电子平均自由程有较大的涨落, $\delta l$  钉扎在掺杂体系中占主导作用. Ghorbani 等人<sup>[16]</sup>研究了硅油掺杂的  $\text{MgB}_2$  体系中集体钉扎随温度的变化关系,发现  $\delta l$  钉扎在低温区域起主要作用,但当温度接近超导转变温度  $T_c$  时, $\delta T_c$  钉扎则逐渐占据主导作用.

为了更好的理解  $\text{MgB}_2$  体系中的钉扎行为,本文研究了柠檬酸掺杂对  $\text{MgB}_2$  超导材料的超导转变温度、 $J_c$ - $B$  行为、以及磁通钉扎特性的影响. 发现在纯  $\text{MgB}_2$  多晶样品中  $\delta T_c$  钉扎起主要作用,但在掺杂的样品中  $\delta l$  钉扎和  $\delta T_c$  钉扎共同作用,且  $\delta l$  钉扎机理的贡献随着掺杂的增加而增加.

## 2. 实验方法

本文研究的柠檬酸 ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) 掺杂的  $\text{MgB}_2$  材料由化学溶剂法制备得到,制备方法如正文所示:将占  $\text{MgB}_2$  总质量为 0%, 5%, 15%, 20%, 30% 的柠檬酸分别溶于丙酮中,把 B 粉加入溶液搅拌并超声震荡,使 B 粉均匀分散后将得到的悬浊液搅拌干燥,将得到的粉末和相应比例的镁粉在氩气保护下混合研磨 1 h,然后将其压制直径为 10 mm 的圆片,在氩气保护下进行烧结,以  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率由室温升到  $800^\circ\text{C}$ ,保温 2 h 后,随炉冷却至室温,得到  $\text{MgB}_2$  超导块材. 磁测量和电输运测量分别采用超导量子干涉仪磁强计 MPMS 和物理性能测试系统 PPMS. 临界电流密度由 Bean 模型计算得到<sup>[17]</sup>. 晶体结构测试由 X 射线衍射图谱的结果得到,其表明  $\text{MgB}_2$  仍为样品中的主相,当掺杂量较高时有少量的  $\text{MgO}$  杂相.

## 3. 实验结果与讨论

图 1 为转变温度  $T_c$  随柠檬酸掺杂的变化曲线和线性拟合结果,可以看出转变温度  $T_c$  随着掺杂量的增加线性下降,这与其他研究小组结果一致<sup>[18-21]</sup>. 碳掺杂会在  $\text{MgB}_2$  中引入电子,造成空穴载流子浓度的下降,并且碳掺杂引起的散射会使  $\text{MgB}_2$  超导能隙变小,从而引起超导转变温度的下降. X 射线衍射结果显示(为简洁起见,结果没有在本文中给出),在柠檬酸掺杂的系列样品中,其 (100) 峰随掺杂浓度增大而向衍射角增大的方向移

动,表明有部分 B 原子被 C 原子替代. 这与超导转变温度随掺杂线性下降的结果相一致.

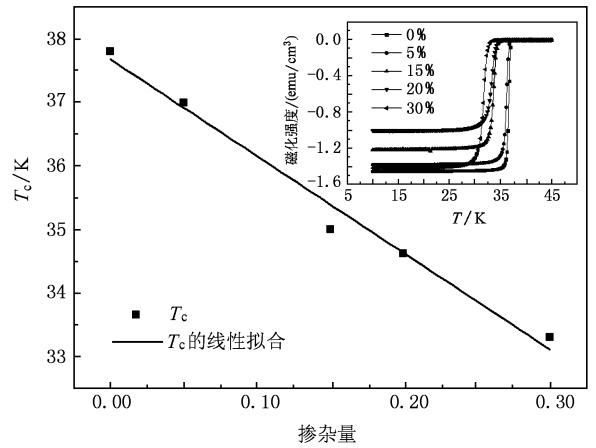


图 1 柠檬酸掺杂样品的  $T_c$  随掺杂量的变化(插图为不同掺杂量样品在超导转变附近其磁化强度随温度变化的曲线)

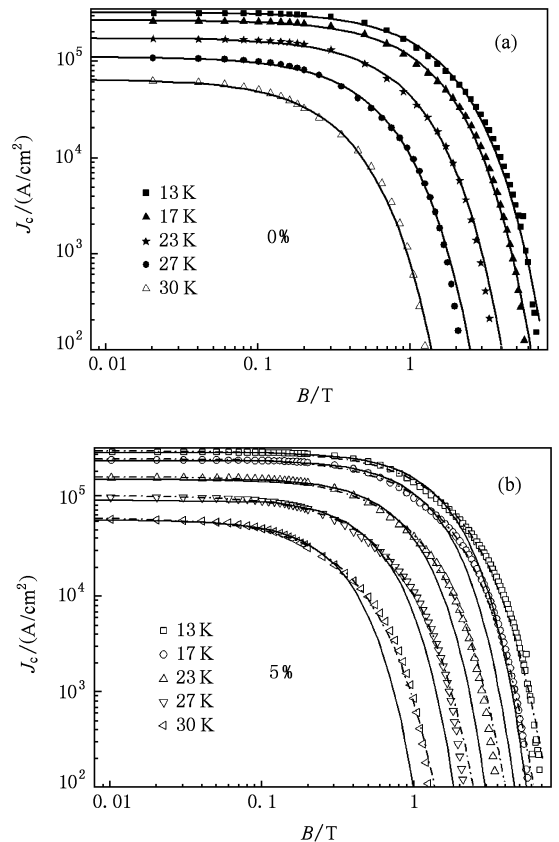


图 2 纯的和掺杂的  $\text{MgB}_2$  样品的  $J_c$ - $B$  实验结果以及利用集体钉扎模型拟合的结果(实线为(2)式的拟合曲线,虚线为(3)式的拟合曲线) (a)纯  $\text{MgB}_2$  样品;(b)掺杂量为 5% 的样品

除了对超导临界温度的影响之外,C 原子替代

B 原子进入  $\text{MgB}_2$  晶格中,还有可能对  $\text{MgB}_2$  超导材料的载流性能和钉扎机理产生一定的影响. 图 2 (a), (b) 分别给出了纯样和 5% 柠檬酸掺杂样品在不同温度下的临界电流密度  $J_c$  随磁场  $B$  变化的曲线(其他掺杂量的样品的结果与此基本相同). Qin 等人<sup>[14]</sup>认为,  $\text{MgB}_2$  体系中的钉扎行为符合集体钉扎行为,采用小集体钉扎模型可以很好地对  $J_c(B)$  曲线进行拟合. 利用拟合所得到的  $B_{sb}(T)$  温度变化特性可以判断,在纯  $\text{MgB}_2$  体系中,钉扎行为主要表现为  $\delta T_c$  钉扎的特性. 为了更好的研究柠檬酸掺杂对  $\text{MgB}_2$  钉扎性能的影响,本实验中同样利用集体钉扎理论<sup>[22]</sup>对样品的钉扎机理进行分析. 图 2 中实线为利用小集体钉扎模型的  $J_c(B)$  关系

$$J_c(B) \approx J_c(0) \exp \left[ - \left( \frac{B}{B_0} \right)^{3/2} \right], \quad (2)$$

对实验数据的拟合结果. 图 2(a) 中的结果表明,上述  $J_c(B)$  表达式(2)式能够很好的描述纯样的  $J_c-B$  行为.

然而,掺杂样品  $J_c-B$  行为仅在低场区域符合(2)式,但在中高场区发生严重偏离(见图 2(b) 中的实线). 考虑到指数 3/2 反映的是高场下临界电流密度  $J_c$  随磁场  $B$  增加的衰减程度,因此,我们把指数 3/2 设为参数,利用拟合关系式

$$J_c(B) \approx J_c(0) \exp \left[ - \left( \frac{B}{B_0} \right)^c \right] \quad (3)$$

对掺杂样品进行拟合. 如图 2(b) 所示,实验结果能够被(3)式很好地拟合(见虚线). 上述结果表明,设定  $c$  参数能更好地描述 5%—30% 掺杂样品的实验数据,且拟合结果得到的  $c$  值均小于 1.5. 大量实验结果表明,碳掺杂可以有效提高  $\text{MgB}_2$  超导体上临界场和高场下的载流能力. 本研究对柠檬酸掺杂样品的  $J_c-B$  关系的实验结果所进行的拟合表明,掺杂样品的拟合参数  $c$  小于纯样品的拟合参数 1.5 正是说明了,高场下的载流能力的提高来源于 C 掺杂导致的集体钉扎效应的增强.

与图 2 相对应,图 3 给出了 13 K, 17 K 和 25 K 下不同掺杂  $\text{MgB}_2$  样品的临界电流密度随磁场的变化曲线. 发现高场下,在 13 K 和 17 K 时,纯样的临界电流密度随磁场的变化曲线比所有掺杂的样品衰减更为迅速. 所研究的样品中,柠檬酸掺杂量为 15% 的  $\text{MgB}_2$  表现出最优的结果,高场下的  $J_c$  值要高于所有样品. 掺杂导致高场  $J_c$  增强的微观机理,可能是由于 B 原子被 C 原子替代后,在晶格中引入

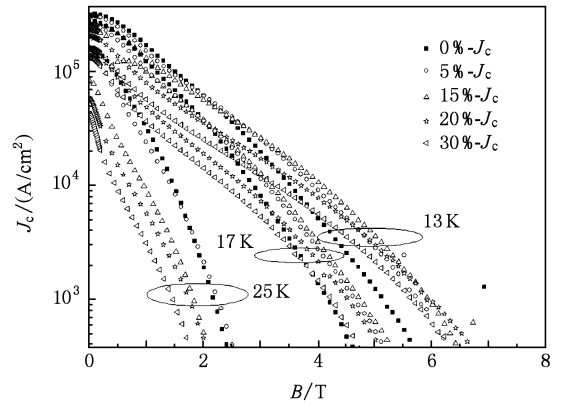


图 3 不同剂量的柠檬酸掺杂的样品在 13 K, 17 K, 25 K 下的临界电流密度随磁场的变化曲线

畸变,所引起的空间无序可以作为有效的钉扎中心,从而增大了钉扎密度. 因此,掺杂样品的临界电流密度随外场增加而衰减的速度要远低于纯样衰减的速度,从而在高场下表现出较好的载流性能. 但柠檬酸掺杂过量时(例如 20%, 30%),有可能导致过量的杂相(如  $\text{MgO}$  等)的产生过多的第二相  $\text{MgO}$  堆积在晶界间,阻碍了超导电流的通道,使载流性能下降. 温度为 25 K 时,掺杂样品的载流性能有较大的衰退,这可能是由于高掺杂样品受到超导转变温度下降的影响,  $J_c$  值在转变温度附近会以较快的速度衰减. 然而,其  $J_c-B$  特性仍优于纯样,表明掺杂导致的钉扎增强仍占居主导地位. 在集体钉扎理论中,可以利用  $B_{sb}$  与  $t(T/T_c)$  的关系来确定钉扎类型. 通过做  $-\log[J_c(B)/J_c(0)]$  对  $B$  的双对数曲线<sup>[14—16]</sup>获取  $B_{sb}$  值. 从图 2 所示的  $J_c(B)$  拟合结果可以看出,上述方法不适合本实验样品. 因此,采用 Wang 等人<sup>[15]</sup>利用理论推导出对于  $\delta T_c$  钉扎和  $\delta l$  钉扎单涡旋钉扎区域的临界电流密度  $J_c$ <sup>[23]</sup>随温度变化的关系( $t = T/T_c$ )来确定钉扎类型. 对于  $\delta T_c$  钉扎

$$J_c(t)/J_c(0) = (1 - t^2)^{7/6} (1 + t^2)^{5/6}, \quad (4)$$

对于  $\delta l$  钉扎

$$J_c(t)/J_c(0) = (1 - t^2)^{5/2} (1 + t^2)^{-1/2}. \quad (5)$$

图 4 为磁场  $B = 0.01$  T(系统处于单涡旋钉扎状态)时,  $J_c$  随  $t(T/T_c)$  的变化关系以及利用(4)式和(5)式对实验数据的拟合结果. 可以看出,对未掺杂的  $\text{MgB}_2$ ,  $\delta T_c$  钉扎为主要的钉扎机制(见图 4(a)). 对柠檬酸掺杂的样品(参见图 4(b)),其  $J_c(t)$  关系在低温下与  $\delta l$  钉扎一致. 然而,随着温度的增加,其  $J_c(t)$  关系逐渐与  $\delta l$  钉扎曲线发生偏离,

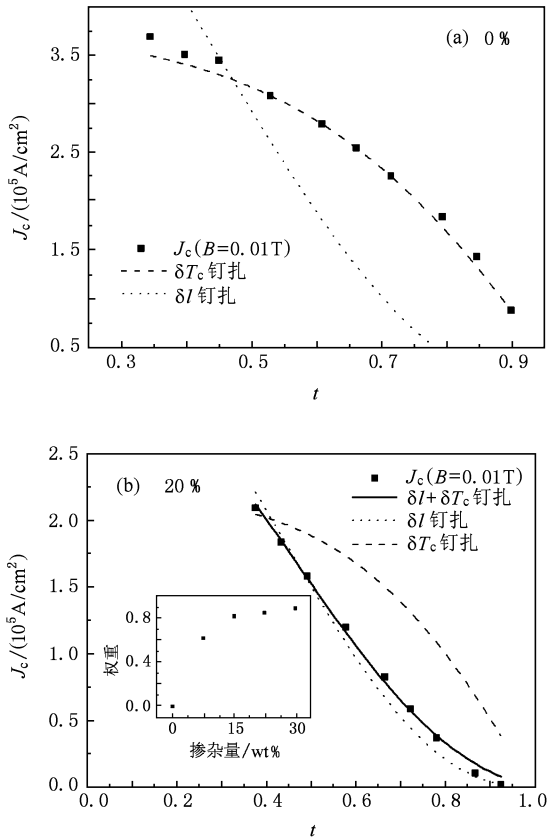


图4 纯的和柠檬酸掺杂样品的  $J_c-t$  曲线 (a) 纯样品; (b) 20% 掺杂样品 (插图所示的是  $\delta l$  钉扎的贡献比例  $w$  随掺杂量变化关系)

表明随着温度升高,  $\delta T_c$  钉扎逐渐发挥作用. 图 4 (b) 给出的是典型的掺杂样品 (20% 掺杂) 的结果, 与 Ghorbani 等人<sup>[16]</sup> 在硅油掺杂的 MgB<sub>2</sub> 中发现  $\delta T_c$  钉扎与  $\delta l$  钉扎同时存在的观察结果相一致, 即在低温时主要为  $\delta l$  钉扎, 随着温度的升高  $\delta T_c$  钉扎的作用逐渐增加. 目前, 多数对 MgB<sub>2</sub> 钉扎机理的研究<sup>[14-16]</sup> 只限于讨论特定样品的钉扎行为, 而没有系统地研究掺杂量的变化对钉扎机理的影响. 因此, 为了更好的研究  $\delta l$  钉扎和  $\delta T_c$  钉扎随掺杂的变化机理, 我们按照 Ghorbani 等人的方法用权重的表达式来描述两种钉扎在掺杂样品中的作用机理. 以  $w$  代表  $\delta l$  钉扎的贡献比例, 则  $J_c(t)$  关系可用下式表示:

$$J_c = wJ_c^l + (1 - w)J_c^T. \quad (6)$$

图 4(b) 中实线为柠檬酸掺杂的实验数据以及用 (6) 式拟合的结果, 可以看出, (6) 式能够很好地描述掺杂样品的  $J_c(t)$  关系. 对其他四个掺杂样品的数据所做的拟合与上述的结果也基本一致. 从而

表明, 柠檬酸掺杂的样品主要为  $\delta l$  钉扎, 同时也存在  $\delta T_c$  钉扎作用. 对四个掺杂样品的钉扎机理的比较可以看出 (见图 4(b) 插图), 随着掺杂的增加, 实验结果与  $\delta l$  钉扎曲线越来越接近,  $\delta T_c$  钉扎作用越来越弱.  $\delta l$  钉扎可能与 C 对 B 位的替代所导致的 MgB<sub>2</sub> 晶格中的无序有关, 因为晶格无序增加了剩余电阻率, 使电子的平均自由程  $l$  减小<sup>[24-26]</sup>. 为此, 我们研究了柠檬酸掺杂样品的剩余电阻  $\rho_0$  随掺杂量的变化关系, 其中  $\rho_0 = \rho_{\text{measure}}(40 \text{ K}) \Delta\rho_{\text{ideal}} / \Delta\rho_{\text{measure}}$ ,  $\Delta\rho_{\text{measure}} = \rho_{\text{measure}}(300 \text{ K}) - \rho_{\text{measure}}(40 \text{ K})$ <sup>[27,28]</sup>,  $\Delta\rho_{\text{ideal}}$  为纯单晶样品的值, 大小为  $4.3 \mu\Omega\text{cm}$ . 如图 5 所示, 剩余电阻随着掺杂量的增加而增大, 这与  $\delta l$  钉扎的贡献比例  $w$  随着掺杂量的增加而增大相一致. 然而, 剩余电阻随着掺杂量的增加线性增加, 而  $\delta l$  钉扎的贡献比例  $w$  随着掺杂量的增加到 15% 时趋于平缓. 产生这种现象的原因可能是: 剩余电阻的增加与转变温度的下降都可能与 C 对 B 位的掺杂以及与 MgO 等杂相的产生有关, 因此都表现出随掺杂量的增加线性变化的特征. 然而,  $\delta l$  钉扎可能主要是由于 C 对 B 位的掺杂引起的无序而产生的钉扎作用. 因此, 我们发现掺杂量为 15% 时, 对钉扎机理的影响趋于饱和, 过量的掺杂会增加杂相的产生, 对临界电流密度产生阻碍作用, 降低材料的性能, 这与前面得到的低温时掺杂量为 15% 的样品表现出最好的性能结果相符合.

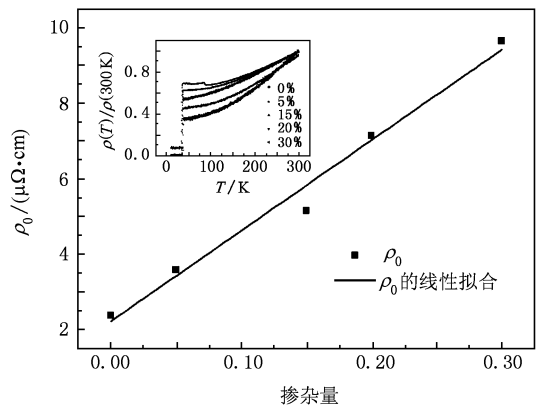


图5 剩余电阻随掺杂量的变化曲线 (插图为超导转变附近不同掺杂量样品的电阻率随温度变化的曲线)

## 4. 结 论

柠檬酸掺杂降低了 MgB<sub>2</sub> 超导材料的超导转变温度, 提高了高场下  $J_c-B$  行为. 纯 MgB<sub>2</sub> 多晶样品中

$\delta T_c$  钉扎起主要作用;掺杂样品中, $\delta l$  钉扎和  $\delta T_c$  钉扎共同作用,但以  $\delta l$  钉扎机理的贡献为主,并随着掺杂的增加而增加. 根据  $J_c$ - $B$  行为和钉扎机理随掺

杂量的变化关系,发现柠檬酸掺杂为 15% 的  $MgB_2$  超导材料表现出最佳的性能.

- [1] Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T, Zenitani Y, Akimitsu J 2001 *Nature* **410** 63
- [2] Tan M Q, Tao X M 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1193 (in Chinese) [谭明秋、陶向明 2001 物理学报 **50** 1193]
- [3] Yang D S, Wu B M, Li B, Zheng W H, Li S Y, Chen X H, Cao L Z 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2015 (in Chinese) [杨东升、吴柏枚、李波、郑卫华、李世燕、陈仙辉、曹烈兆 2003 物理学报 **52** 2015]
- [4] Yang H S, Yu M, Li S Y, Li P C, Chai Y S, Zhang L, Chen X H, Cao L Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1197 (in Chinese) [杨宏顺、余旻、李世燕、李鹏程、柴一晟、章良、陈先辉、曹烈兆 2001 物理学报 **50** 1197]
- [5] Shang X F, Tao X M, Chen W B, Chen H X, Wang M, Tan M Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5838 (in Chinese) [尚学府、陶向明、陈文斌、陈会贤、王森、谭明秋 2008 物理学报 **57** 5838]
- [6] Shi L B, Ren J Y, Zhang F Y, Zhang G H, Yu Z Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5353 (in Chinese) [史力斌、任骏原、张凤云、张国华、余增强 2007 物理学报 **56** 5353]
- [7] Feng W J, Xia T D, Liu T Z, Zhao W J, Wei Z Q 2005 *Chin. Phys.* **14** 2325
- [8] Chen R H, Zhu M Y, Li Y, Li W X, Jin H M, Dou S X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4878 (in Chinese) [陈荣华、宋明原、李瑛、李文献、金红明、窦士学 2006 物理学报 **55** 4878]
- [9] Zhang X P, Ma Y W, Gao Z S, Yu Z G, K. Watanabe, Wen H H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4873 (in Chinese) [张现平、马衍伟、高召顺、禹争光、K. Watanabe、闻海虎 2006 物理学报 **55** 4873]
- [10] Dou S X, Soltanian S, Horvat J, Wang X L, Zhou S H, Lonescu M, Liu H K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3419
- [11] Zhou S H, Pan A V, Qin M J, Liu H K, Dou S X 2003 *Physica C* **387** 321
- [12] Yamamoto A, Shimoyama J, Ueda S, Iwayama I, Horii S, Kishio K 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** 1323
- [13] Cheng C H, Yang Y, Munroe P, Zhao Y 2007 *Supercond. Sci. Technol.* **20** 296
- [14] Qin M J, Wang X L, Liu H K, Dou S X 2002 *Phys. Rev. B* **65** 132508
- [15] Wang X L, Zeng R, Kim J H, Liu L, Dou S X 2008 *Phys. Rev. B* **77** 174501
- [16] Ghorbani S R, Wang X L, Dou S X, Lee S, Hossain M S A 2008 *Phys. Rev. B* **78** 184502
- [17] Kang W N, Kim H J, Choi E M, Lee S L 2002 *Phys. Rev. B* **65** 64512
- [18] Takenobu T, Ito T, Chi D H, Prassides K, Iwasa Y 2001 *Phys. Rev. B* **64** 134513
- [19] Avdeev M, Jorgensen J D, Ribeiro R A, Bud'ko S L, Canfield P C 2003 *Physica C* **387** 301
- [20] Wang X L, Yao Q W, Horvat J, Qin M J, Dou S X 2004 *Supercond. Sci. Technol.* **17** L21
- [21] Wilke R H T, Bud'ko S L, Canfield P C, Finnemore D K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 217003
- [22] Blatter G, Feigel'man M V, Geshkenbein V B, Larkin A I, Vinokur V M 1994 *Rev. Mod. Phys.* **66** 1125
- [23] Wen H H, Schnack H G, Griessen R, Dam B, Rector J 1995 *Physica C* **241** 353
- [24] Yeoh W K, Dou S X 2007 *Physica C* **456** 170
- [25] Zeng R, Lu L, Wang J L, Horvat J, Li W X, Shi D Q, Dou S X, Tomsic M, Rindfleisch M 2007 *Supercond. Sci. Technol.* **20** L43
- [26] Kazakov S M, Puzniak R, Rogacki K, Mironov A V, Zhigadlo N D, Jun J, Soltmann C, Batlogg B, Karpinski J 2005 *Phys. Rev. B* **71** 024533
- [27] Rowell J M 2003 *Supercond. Sci. Technol.* **16** R17
- [28] Mickelson W, Cumings J, Han W Q, Zettl A 2002 *Phys. Rev. B* **65** 052505

# Evidence of $\delta l$ pinning induced by citric acid doping in $\text{MgB}_2$ superconductor\*

Sun Hui-Hui<sup>1)</sup> Yang Ye<sup>1)†</sup> Wang Lei<sup>1)</sup> Cheng C. H.<sup>2)</sup> Feng Yong<sup>3)</sup> Zhao Yong<sup>1)2)</sup>

1) (*Key Laboratory of Advanced Technology of Materials, Ministry of Education, Superconductivity R&D Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

2) (*School of Materials, University of New South Wales, Sydney 2052, NSW Australia*)

3) (*Northwest Institute for Non-ferrometals, West Superconductivity Technology Co., Xi'an 710016, China*)

(Received 15 July 2009; revised manuscript received 8 September 2009)

## Abstract

The critical current density ( $J_c$ ) and flux-pinning mechanism of  $\text{MgB}_2$  doped with citric acid ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) from 0 to 30wt% have been investigated in detail by magnetic and resistive measurements. The temperature dependence of critical current density,  $J_c(T)$ , at particular field within the single vortex regime was analyzed.  $\delta T_c$  pinning mechanism was found to be the only important pinning mechanism in pure  $\text{MgB}_2$  samples, while  $\delta l$  pinning is dominant with little effect of  $\delta T_c$  pinning for citric acid doped samples. It was observed that the contribution of  $\delta l$  pinning enhances with the increasing doping level of citric acid, and it was also found that  $\text{MgB}_2$  doped with 15wt% citric acid shows the best performance in  $J_c$ - $B$  behavior.

**Keywords:** citric acid,  $\text{MgB}_2$ ,  $\delta T_c$  pinning,  $\delta l$  pinning

**PACC:** 7476G, 7470D, 8230H, 7490

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50588201, 50672078, 50872116), the Special Research Foundation for the Doctoral Program (Grant No. 200806130023), the State Key Development Program of Basic Research of China (Grant No. 2007CB616906), Australian Research Council (Grant Nos. DP0559872, DP0881739), Innovation Foundation for Doctoral Student of Southwest Jiaotong University, Foundation of Science and Technology Developing Program of Southwest Jiaotong University, Innovation Foundation of Scientific and Technological Program of Southwest Jiaotong University.

† Corresponding author. E-mail: yeyang@swjtu.edu.cn