

· 研究简报 ·

三点弯曲加载下YBCO电阻及 K_{1c} 特征研究*

曾文光 林光明 张进修

(物理学系)

摘 要

在300K和77K下,用三点弯曲方法测定了零电阻温度为79~85K的YBCO长条状超导试样的电阻压头位移曲线和平面应变断裂韧性 K_{1c} 。结果表明,77K下零电阻特性可以保持到完全断裂前瞬间,由 K_{1c} 得到的表面能比300K的高,高出的部分可被认为是应力诱导下的少量超导相变所附加的能量。

关键词 断裂韧性, 应力诱导相变, 表面能, 高 T_c 超导体

1 实验和计算

用化学共沉法按123配比得到 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 粉料,在1.0~1.5T/cm²压力下压制出 $3 \times 6 \times 60\text{mm}^3$ 试样,在940℃烧结6小时后翻转再烧结6小时,用4端电位法测定它们的 T_c 为81.5~86.5K,零电阻温度 T_{co} 为79~85K,金属型转变,77K有抗磁性,记录仪精度为 $5\mu\text{V}/\text{cm}$ 。用浮力法测量这些试样的密度为 $5.1\sim 5.9\text{g}/\text{cm}^3$,平均值为 $5.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。将上述试样的每一块切为两块,其中一块用作300K的 K_{1c} 测量,另一块用作77K的 K_{1c} 测量。由于YBCO在这两个温度下都呈脆性(见图1,图2),将这些试样磨制抛光成有效尺寸为 $2.8 \times 5.6 \times 22.4\text{mm}^3$ 的样品,均符合平面应变条件。参照GB4161—84平面应变断裂韧性试验方法,在按比例缩小压头、支承辊曲率半径(光滑陶瓷棒)的自制小型三点弯曲加载装置上进行试验。

试样中部用直径为 $80\mu\text{m}$ 的钼丝蘸320号金刚砂(硅油粘结)拉锯,获得深度为1.5~2.2mm、曲率半径 ρ 为 $55\sim 60\mu\text{m}$ 的深切口,用精度为 $3\mu\text{m}$ 的大型工具显微镜多点测量获得 ρ 值。

其它试验仪器和条件是:通过经ES—001型3等测力计标定的应力传感器测定载荷 P ;用SW—1型微位移传感器测量压头位移 Δ ;用4端电位法记录加载过程中电阻变化,此时的恒流电流1.9mA,由接入电路的微安表监视,电压信号取自切口两侧,记录仪同时记录 $P-\Delta$ 和电阻 $R-\Delta$ 曲线,记录电阻的精度为 $8\mu\text{V}/\text{cm}$ 。在进行77K试验时,压头、支承辊均置于双层硬黄铜制造的开口容器中,使压头以下均能浸泡在液氮中,待稳定于77K才开始试验。试验的加载速度为0.72N/S。

本文1988年9月6日收到

*广东省自然科学基金资助课题,曹立新、李宝峰参加部分工作

在测量了断裂载荷 P_m 、切口深度 a 以及 B 、 W 和跨距 S 后，据上述标准中的计算公式算出 P_m 下的应力强度因子值，我们把它叫做 $K_{I\rho}$ 。根据单晶硅在几个取向的系统试验，实验结果有 $K_{Ic} = K_{I\rho} \cdot (50/\rho)^{\frac{1}{2}}$ 的关系¹⁾(ρ 用 μm 作单位)，由此得到各个试样的 K_{Ic} 值。

用应变片测量压缩应变(由应变仪标定)，由压缩应力—应变曲线估计所测YBCO的弹性模量 E 为 $1.5 \sim 1.7 \times 10^5 \text{MPa}$ ，取平均值为 $1.6 \times 10^5 \text{MPa}$ 。

2 结果和讨论

2.1 $P-\Delta$ 和 $R-\Delta$ 曲线 图1是300K下的 $P-\Delta$ 和 $R-\Delta$ 曲线(以相对坐标表出，下同)，可见此时随压力 P 的增大， R 逐渐增大，与通常材料的变化规律相同。图2是77K下的情况，随压力 P 的增大， R 不变，保持零电阻状态，可见在比零电阻温度稍低温度下，试样在三点弯曲加载应力状态下保持超导状态直至被压断前的瞬间。这表明在裂纹形成(切口试样)和扩展过程中在 $8\mu\text{V}/\text{cm}$ 记录精度下，YBCO块状超导体存在超导电流通路。

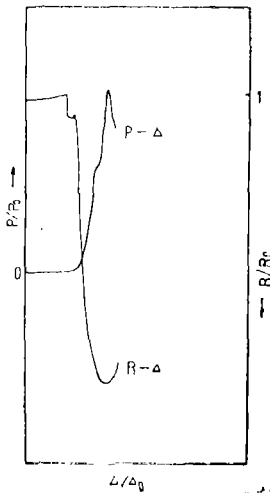


图1 500K下的原始记录曲线。断裂时载荷为23.7N。各量均以相对值标出。纵横坐标均按线性等分

Fig.1 The recorded curves of $P/P_0-\Delta/\Delta_0$ and $R/R_0-\Delta/\Delta_0$ at 300K. The fracture load is 23.7N

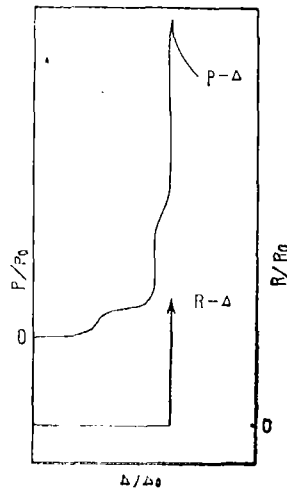


图2 77K下的原始记录曲线。断裂时载荷为47.8N。各量均以相对值标出。纵横坐标均按线性等分

Fig.2 The recorded curves of $P/P_0-\Delta/\Delta_0$ and $R/R_0-\Delta/\Delta_0$ at 77K. The fracture load is 47.8N

2.2 K_{Ic} 值及断裂表面能 300K下7支试样的平均断裂韧性值为 $K_{Ic} = 0.94 \pm 0.12 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ，77K下12支试样的这个值为 $K_{Ic} = 1.21 \pm 0.16 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

根据线弹性理论，脆性材料断裂表面 Γ 为^[1] $K_{Ic}^2(1-\nu^2)/E$ 。陶瓷材料可取泊松比 $\nu = 0.25$ ，可得到300K下的 Γ 为 $5.1 \text{J}/\text{m}^2$ ，77K下的 Γ 为 $8.4 \text{J}/\text{m}^2$ ，77K下的 Γ 比300K的高，与通常结构材料的规律不同。对于如氧化锆一类陶瓷材料随温度下降 K_{Ic} 上升的特

1) 蒋成海，中山大学研究生毕业论文，1982

性, 已经被认为是应力诱导相变吸收了附加能量所致^[2,3]. 对高 T_c 超导材料, 朱经武等做了等静压试验, 认为压力增大能使 T_c 稍提高^[4]. 根据相变提高断裂韧性表达式^[3]

$$K_c = [K_0^2 + 2rEVF/(1-\nu^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中 K_0 是未相变时的应力强度因子, F 是诱导相变应力场的单位体积所消耗的功, r 是由断裂表面算起的相变区深度, V 是相变体积百分数. 由(1)式的推导可见, 对于300~77K范围除超导转变外无其他相变时, 该式对讨论超导相变仍然适用. 在平面应变条件下, (1)式中的临界应力强度因子 K_c 即本文的 K_{Ic} . 取300K的 K_{Ic} 值为(1)式中的 K_0 , 77K的 K_{Ic} 值为(1)式中的 K_c , 取 r 为晶粒尺寸^[3], 由扫描电镜断口观察测得 r 约为 $1\mu\text{m}$ 量级, 则

$$VF = 1.5\text{MJ}/\text{m}^3 \quad (2)$$

平均地取 $V = 0.5$, 在300~77K区间外应力场用于诱导相变的功密度为 $3 \times 10^6\text{J}/\text{m}^3$ 量级, 因缺乏热力学数据, 此处无法直接比较. 这个量级与 ZrO_2 ^[2,3]相比显然很小, 即如果 $V = 0.5$, 应力对YBCO影响很小. 但是, 若 $V = 1\%$, 则 F 可达 $150\text{MJ}/\text{m}^3$, 已可与 ZrO_2 相比较了, 这表示此时加足够的应力对提高 T_c 会有一定的效果.

参 考 文 献

- [1] 陈麓等, 工程断裂力学, 国防工业出版社, 1977, 100
- [2] Orange G et al., *J. de Physique Colloque*, C1(1986), C1-655
- [3] Langc F F, *J. Mater. Sci.*, 17(1982), 235
- [4] Chu C W et al., *Phys. Rev. Lett.*, 58(1987), 405

A Characteristic Study of Resistance and K_{Ic} of YBCO by Three Point Bend Method

Zeng Wenguang* Lin Guangming Zhan JinXiu

Abstract

The curves of resistance-displacement of the loadhead and the fracture toughness K_{Ic} have been determined in 300K and 77K respectively by using the three point bend method for the high T_c superconductor YBCO samples. It is shown that (1) the character of zero resistance in 77K can be held under loading untill the sample has been ruptured completely; (2) the surface energy computed from K_{Ic} in 77K is larger than that in 300K, it can be explained with the phase transition induced by stress field.

Keywords fracture toughness, phase transition induced by stress, surface energy, high T_c superconductor

*Department of Physics