

# Nb<sub>3</sub>Sn 超导材料的高场钉扎行为

曹 忠 胜<sup>1)</sup> 崔 长 庚

(中国科学院物理研究所)

周 廉

(宝鸡有色金属研究所)

1986年7月2日收到

## 提 要

本文利用线性回归分析法处理扩散和气相沉积 Nb<sub>3</sub>Sn 带材样品以及青铜法多芯 Nb<sub>3</sub>Sn 线材样品在高场 (~22T) 下的临界电流测试数据, 得到  $J_c$ - $B$  曲线和钉扎力随磁场变化的经验规律. 该规律与 Kramer 模型的钉扎力公式不一致, 有待提出新的理论模型加以说明.

## 一、引 言

Nb<sub>3</sub>Sn 是制造超导强磁体的主要超导材料. 对于产生强磁场来说, 最重要的超导体性能是临界电流密度  $J_c$  (具有合适的临界温度  $T_c$  和临界磁场  $B_{c2}$ ), 而了解  $J_c$  的关键是磁通钉扎机制. 因此, 研究这种高场超导材料的  $J_c$ - $B$  曲线规律, 寻找新的磁通钉扎公式, 具有重要的实际意义.

本文部分作者利用已有的实验条件测定了这两种材料在高场 (~22T) 和不同温度 (4.2K, 2.85K, 2.18K) 下的临界电流<sup>[1]</sup>. 本文利用线性回归分析法处理上述有关测试数据, 得到很好的  $J_c$ - $B$  曲线和钉扎力随磁场变化的经验规律.

通常, 不少作者在解释 A-15 超导材料的高场临界电流和钉扎特性时常常借助于 Kramer 模型<sup>[2]</sup>. 该模型给出高场钉扎力密度为

$$F_s(T, b) = K_s(T)b^{1/2}(1-b)^2, \quad (1)$$

$$K_s = 2c_s H_c^2 H_{c2}^{1/2}, \quad (2)$$

式中  $b = B/B_{c2} = B/\mu_0 H_{c2}$ ,  $B$  是磁感强度,  $H_{c2}$  是上临界场,  $b$  是约化磁感,  $H_c$  是热力学临界场,  $T$  是绝对温度,  $c_s$  是仅与钉扎中心密度有关的系数. 当  $b = 1/5$  时, 最大钉扎力密度为

$$F_{s,max} = (16/25 \sqrt{5}) K_s.$$

约化钉扎力为

$$f_{PK} = F_s/F_{s,max} = (25\sqrt{5}/16)b^{1/2}(1-b)^2. \quad (3)$$

1) 现在在中国科学技术大学研究生院.

本文得到的  $J_c$ - $B$  曲线和钉扎力随磁场变化的经验规律符合标度律行为

$$F_p(T, b) = B_{c2}^m(T)G(b),$$

但与 Kramer 模型给出的钉扎力 (1) 式和 (3) 式明显不一致。一些作者所发表的  $J_c$  测量数据的分析结果也表明, Kramer 模型不适合描述 Nb<sub>3</sub>Sn 超导材料的高场钉扎行为。因此需要提出新的理论模型来说明这种重要超导材料的钉扎特性<sup>[3]</sup>。

## 二、 $J_c$ - $B$ 曲线和钉扎力的经验规律

我们用线性回归分析法处理了 5 种样品的临界电流  $I_c$  测试数据。样品 1 和样品 2 的  $I_c$  测量结果可参阅文献 [1]。样品 1 是宁夏有色金属研究所利用扩散法生产的商品带材 4KZ1, 样品 2 是长沙矿冶研究所利用气相沉积法生产的商品带材 E 807。临界电流定义为当电位引线间出现  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$  的电位时样品中通过的电流。为了比较, 对这两个样品还同时测试了以  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  为判据的临界电流。本文部分作者测量了这两种样品的 Nb<sub>3</sub>Sn 截面积  $S_1$  和  $S_2$ 。它们分别为:  $S_1 = 4.545 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ ,  $S_2 = 5.012 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ 。

样品 3, 样品 4 和样品 5 是宝鸡有色金属研究所用青铜法制备的多芯 Nb<sub>3</sub>Sn 线材, 其线径为  $0.53 \text{mm}$ , 芯数为 2886, 它们的热处理工艺参数分别为:  $700^\circ\text{C}/168 \text{h}$ ,  $700^\circ\text{C}/100 \text{h}$ ,  $700^\circ\text{C}/48 \text{h}$ 。在温度为  $4.2 \text{K}$  时测量了样品 3 和样品 5 的高场  $I_c$ 。在 3 种不同的温度 ( $4.2 \text{K}$ ,  $2.85 \text{K}$ ,  $2.18 \text{K}$ ) 下测试了样品 4 的高场  $I_c$ 。这 3 种样品的临界电流密度  $J_c^0$  是利用它们的 Nb 加青铜(即包括反应生成的 Nb<sub>3</sub>Sn 加残留的 Nb 和青铜)的截面积  $S^0$  计算的。

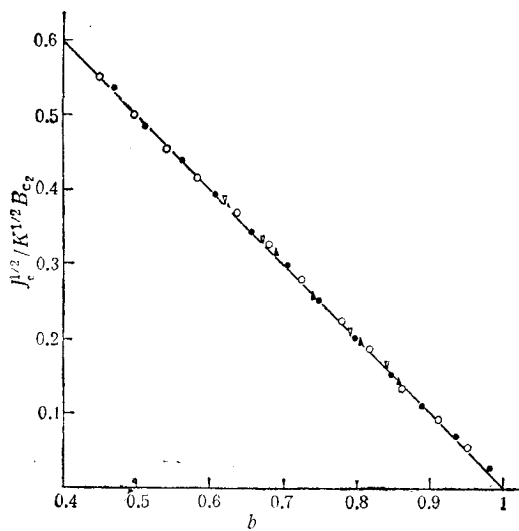


图1 约化临界电流  $J_c^0/K^{1/2}B_{c2}$  与约化磁场的线性关系 ( $J_c^0/K^{1/2}B_{c2} = (1-b)$ )

扩散法: ●为  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ , ○为  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ; 气相沉积法: ▲为  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ , ▽为  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$

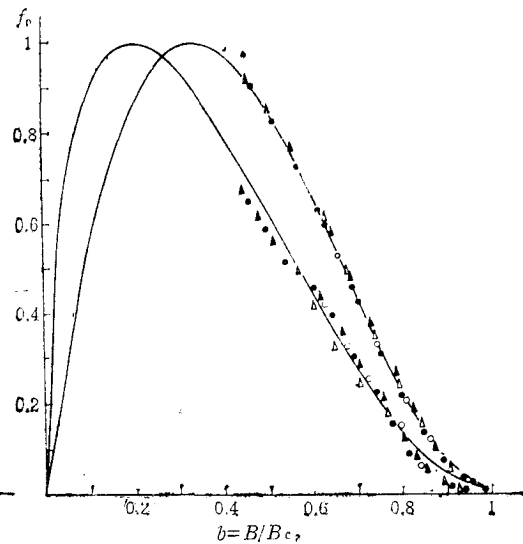


图2 约化钉扎力  $f_p$  的经验规律与 Kramer 模型的  $f_{pK}$  比较

扩散法: ●为  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ; ▲为  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ; 气相沉积法: ○为  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ; ▽为  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$

这 5 种样品的各组  $J_c$  数据的处理结果表明, 它们的  $J_c$ - $B$  曲线形式均为

$$J_c = K(a - B)^2. \quad (4)$$

有关的数据处理参数分别为: 相关系数  $|\gamma| = 0.9991-0.9998$ ; 平方平均偏差

$$\Delta S = 0.004-0.159(T),$$

相对误差  $\Delta S/B = 0.02-1.59\%$ . 这些参数值表明, (4) 式很好地描述了  $Nb_3Sn$  在高场时的  $J_c$ - $B$  曲线形式.

在 (4) 式中, 由  $J_c = 0$ , 可得:  $B_{c_2} = a$ . 因此,  $Nb_3Sn$  材料的  $J_c$ - $B$  曲线经验规律为

$$J_c = KB_{c_2}^2(1 - b)^2. \quad (5)$$

图 1 表明, 实验数据  $J_c^2/K^{1/2}B_{c_2}$  与约化磁场  $b$  之间存在很好的线性关系. 由  $B = 0$ , 可得最大临界电流密度为  $J_{c_{max}} = KB_{c_2}^2$ .

钉扎力密度为  $F_p = J_c B$ , 其经验规律为

$$F_p = KB(B_{c_2} - B)^2 = Nb(1 - b)^2, \quad (6)$$

表 1

经验规律		$J_c = KB_{c_2}^2(1 - b)^2$			$F_p = Nb(1 - b)^2$	
测试温度 4.2 K		$K$ ( $10^8 \frac{A^2}{N^2}$ )	$B_{c_2}$ (T)	$J_{c_{max}}$ $10^4(A/cm^2)$	$N$ ( $10^5 \frac{N}{cm^3}$ )	$F$ ( $10^4 \frac{N}{cm^2}$ )
1 4KZ1	0.1	0.341	21.363	155.835	3.329	4.932
	1	0.324	22.038	157.130	3.463	5.130
2 E807	0.1	0.944	17.468	288.044	5.030	7.452
	1	0.876	17.758	276.244	4.904	7.265

表 2

经验规律		$J_c^{ov} = K^{ov}B_{c_2}^2(1 - b)^2$		$F_p^{ov} = N^{ov}b(1 - b)^2$	
$I_c$ 判据 ( $0.1 \mu V/cm$ )		$K^{ov}$ ( $10^6 \frac{A^2}{N^2}$ )	$B_{c_2}$ (T)	$N^{ov}$ ( $10^4 \frac{N}{cm^3}$ )	$F_p^{ov}$ ( $10^3 \frac{N}{cm^2}$ )
青铜法(多芯) $Nb_3Sn$ 样品	测试 温度(K)				
	3 700°C/168h	4.2	8.091	20.594	7.067
4 700°C/100h	4.2	7.289	20.802	6.561	9.720
	2.85	6.197	22.634	7.186	10.646
	2.18	6.427	22.815	7.632	11.668
5 700°C/48h	4.2	7.941	20.648	6.991	10.356

注: 带上标  $ov$  的参数是利用样品的  $Nb_3Sn$  加青铜的截面积计算的.

其中  $N = KB_c^3$ 。由(6)式可得,当  $b_{\max} = 1/3$  时,最大钉扎力密度为:  $F_{p\max} = (4/27)N$ 。约化钉扎力  $f_p$  为

$$f_p = \frac{F_p}{F_{p\max}} = \frac{27}{4} b(1-b)^2. \quad (7)$$

该式的  $f_p$  显然不同于(3)式中 Kramer 模型给出的  $f_{pK}$ 。图2中给出了  $f_p$  和  $f_{pK}$  随  $b$  变化的曲线,两者的差别甚大。 $f_{pK}$  的最大值在  $b = 1/5$  处,而  $f_p$  的最大值在  $b = 1/3$  处,它反映了 Nb<sub>3</sub>Sn 材料的高场钉扎特性,这是 Kramer 模型无法描述的。

图3和图4分别给出样品1—2和样品3—5的  $F_p$ - $B$  曲线。表1给出了由样品1和样品2的  $I_c$  测试数据得到的  $B_{c2}$ ,  $K$ ,  $N$ ,  $J_{c\max}$  和  $F_{p\max}$  等值。在表2中,样品3,样品4和样品5的这些相应参量和系数是利用 Nb<sub>3</sub>Sn 加青铜的截面积计算的。这些结果表明,样品制备工艺,测试温度,  $I_c$  的  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$  和  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  判据对 Nb<sub>3</sub>Sn 材料的  $J_c$ - $B$  曲线和  $F_p$ - $B$  曲线的形式无明显影响,它们仅改变了曲线的有关参量和系数。

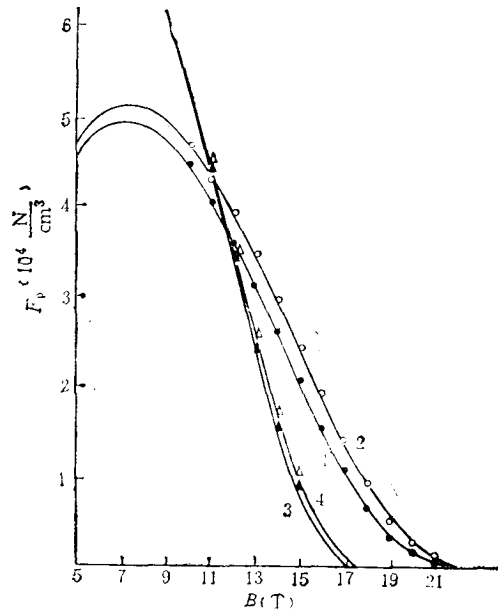


图3 样品4KZ1和E807的  $F_p$ - $B$  曲线 ( $F_p = KB(B_{c2} - B)^2$ )  
扩散法: 曲线1为  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ , 曲线2为  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ; 气相沉积法: 曲线3为  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ , 曲线4为  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$

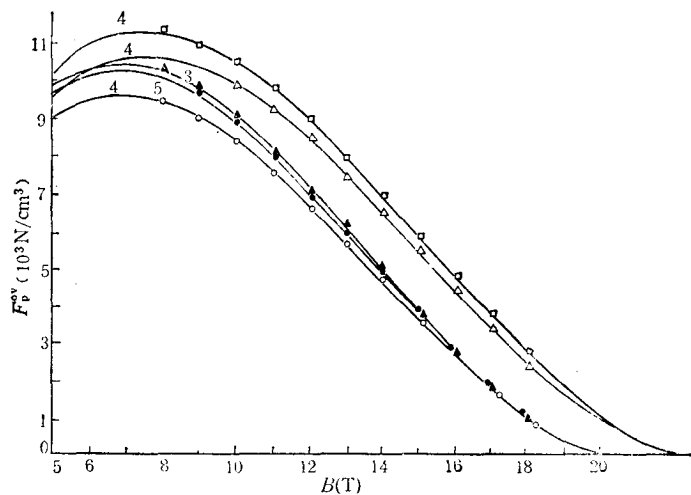


图4 青铜法(多芯) Nb<sub>3</sub>Sn 样品的  $F_p^v$ - $B$  曲线 ( $F_p^v = K^v B(B_{c2} - B)^2$ )  
曲线3为  $700^\circ\text{C}/168\text{h}$ ,  $4.2\text{K}$  (●); 曲线4为  $700^\circ\text{C}/100\text{h}$ ,  $4.2\text{K}$  (○),  
 $2.85\text{K}$  (△),  $2.18\text{K}$  (□); 曲线5为  $700^\circ\text{C}/48\text{h}$ ,  $4.2\text{K}$  (▲)

### 三、讨 论

1. 图 3, 图 4 和表 1 表明, 扩散法制备样品的  $B_{c_2}$  较高, 具有较好的高场钉扎性能, 气相沉积法制备样品的  $B_{c_2}$  较低, 低场钉扎力很强。

2. 样品制备工艺, 测试温度和  $I_c$  的  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$  与  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  判据对  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  材料的  $J_c$ - $B$  曲线和  $F_p$ - $B$  曲线的形式无明显影响, 仅仅改变其系数。在缺少高场条件下, 可用此公式由较低场  $J_c(10-12\text{T})$  推算高场  $J_c$ 。

3. 图 1 和图 2 表明, 本文得到的  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  材料的  $J_c$ - $B$  曲线和钉扎力的经验规律不能用 Kramer 模型的 (1) 式描述, 需要提出新的理论模型加以说明。有关该结果的理论分析将另文讨论。

曾与赵忠贤、丁世英、尹道乐等同志进行过有益的讨论, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 周廉、崔长庚, 低温物理, 7(1985), 46.
- [2] K. J. Kramer, *J. Appl. Phys.*, 44(1973), 1360.
- [3] M. Suenaga, *Superconductor Materials Science*, (1981), p. 201.

## THE CHARACTERIZATION OF FLUX PINNING FORCE FOR $\text{Nb}_3\text{Sn}$ SUPERCONDUCTING MATERIALS IN HIGH MAGNETIC FIELDS

CAO ZHONG-SHENG<sup>1)</sup> CUI CHANG-GENG

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ZHOU LIAN

(*Baoji Institute for Non-ferrous Metal Research, Shanxi*)

### ABSTRACT

Experimental results of  $J_c(B)$  in high magnetic fields for diffusion and CVD  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  tapes and MF  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  wires have been analysed by using regression analysis, the empirical rules for  $J_c(B)$  and  $F_p(B)$  in high magnetic fields were obtained. The rules are different from Kramer scaling law. There is a need for a new model of flux pinning mechanism to explain the empirical rules.

1) The Graduate School, University of Science and Technology of China, Beijing.