

ITER 用 NbTi 超导线材微观组织及性能

李建峰¹, 张平祥^{1, 2, 3}, 刘向宏³, 李金山¹, 冯 勇³, 王天成³, 杜社军³, 刘维涛³,
G. Grunblatt⁴, C. Verwaerde⁴, G. K. Hoang⁴

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(3. 西部超导材料科技有限公司, 陕西 西安 710018)

(4. 法国 ALSTOM 公司, 法国 90018)

摘 要: 本研究以国际热核聚变反应堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)磁体极向场用 NbTi 超导线材的性能优化为目的, 通过 TEM 研究热处理工艺对 NbTi 超导线材微观组织及 4.2 K 温度下临界电流的影响。结果表明, 具有高 J_c 值的 NbTi 在 4.2 K 条件下析出具有典型形貌的 α -Ti 钉扎中心, 即弥散分布于 β -NbTi 基体上, 高度褶皱及卷曲。较高温度的热处理有利于 4.2 K 下 J_c 的提高, 但增加热处理次数使 J_c 值略微降低。

关键词: ITER; NbTi 超导线; 微观组织; 临界电流

中图分类号: TG 132.26

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)02-0263-03

国际热核聚变实验堆(ITER)计划, 是目前全球规模最大的国际科研合作项目之一。其目标是建造一个核聚变实验堆, 验证和平利用核聚变能的科学和技术可行性。而 NbTi 超导线作为极向场(PF)线圈导体用材料, 要求其工作在 4.5~5 K 的液氦温区。

由于 NbTi 超导线具有很好的加工性能和高的临界电流密度, 因此被广泛应用于大型加速器项目中。ITER 项目中, NbTi 线主要被用来制作 5 T 以下磁场工作的 PF 线圈, 由于 ITER 磁体装置巨大, 因此对 NbTi 超导线的性能要求很高, 既要求在高场下有很好的性能, 又要求较低的磁滞损耗、高的 RRR 值。

对 NbTi 超导线材临界电流密度的要求通常使用国际上普遍认可的 scaling 判据^[1]进行推算。通过推算, NbTi 超导线在 5 T, 4.2 K 时的临界电流密度需达到 2900 A/mm², ITER 对 NbTi 超导线的其他要求见表 1。近些年来, 国际上有许多研究小组对 NbTi 4.2 K 条件下性能的提高展开了广泛深入的研究, 并且取得很大进展^[2-5], 但针对 ITER 特有的参数要求, 目前各国都在进行相关的研究。

本实验选用高均匀性、低杂质含量的 Nb47%Ti (质量分数)合金, 并采用传统多次时效加冷拉伸工艺制备 NbTi 超导线, 并研究 NbTi 超导线微观组织对 4.2 K 下临界电流的影响规律。

表 1 ITER 用 NbTi 股线参数要求

Table 1 The requirement of NbTi strand for ITER

J_c (5 T, 4.2 K)/A·mm ²	2900
Fil. Diam/ μ m	5
Ni plating/ μ m	1~2
n value [5 T, 4.2 K (0.1~1 μ V/cm)]	20
RRR	150

1 实验方法

选用高均匀性、低杂质含量的 Nb47%Ti 合金。

Nb 阻隔层用来阻止 NbTi 芯丝与 Cu 基体界面产生 CuTi 化合物。CuTi 化合物属于脆性相, 它的生成会影响加工性能及 J_c 值。热处理制度选择 380~420 °C, 40~80 h, 本实验制定 3 种热处理规范: HT1, HT2, HT3。具体为: HT1 为 4 次热处理, 热处理制度为 T1; HT2 为 4 次热处理, 热处理制度为 T2 (T2>T1); HT3 为 5 次热处理, 热处理制度为 T2。

1.1 透射电镜(TEM)观察

NbTi 超导线材 TEM 试样采用镀铜的方法使线材样直径达到 3 mm, 并用金刚石刀将其厚度切薄至 100 μ m, 随后再进行离子减薄, 试样微观组织观察采用 JEM-3010 高分辨电镜。

1.2 临界电流测量

收到初稿日期: 2008-05-14; 收到修改稿日期: 2008-09-25

基金项目: 国家科技部“973”项目(2005CB724004); 国际科技合作项目(2007DFA50700)

作者简介: 李建峰, 男, 1981 年生, 博士生, 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072, 电话: 029-86524759, E-mail: Ljfwst@gmail.com

临界电流的测量在中科院合肥等离子体物理研究所进行。选取 0.8 m 长的 NbTi 线缠绕在 Ti6Al4V 合金骨架上，并放置于最高可产生 12 T 的磁场中，测量判据为 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 。临界电流密度是采用称重法测量铜超比之后计算得到。

2 实验结果

2.1 最终线材微观组织

经过不同热处理后其直径为 0.72 mm NbTi 线材

典型横截面透射电镜照片如图 1 所示。由图可见：随着附加应变的增加， $\alpha\text{-Ti}$ 析出相逐渐变细，变长。试样 1 中条带状 $\alpha\text{-Ti}$ 的宽度大约有 2.3 nm，试样 5 中条带状 $\alpha\text{-Ti}$ 的宽度大约有 5.1 nm。同样的热处理次数下， $\alpha\text{-Ti}$ 宽度随着应变的减小而增大；同样的热处理温度下，随着热处理次数的增加，析出相宽度及间距逐渐减小。在 5 T, 4.2 K 下具有最佳临界电流密度的 NbTi 横截面组织中，钉扎相 $\alpha\text{-Ti}$ 具有高度的褶皱和弯曲的形状。其微观组织的相关数据见表 2。

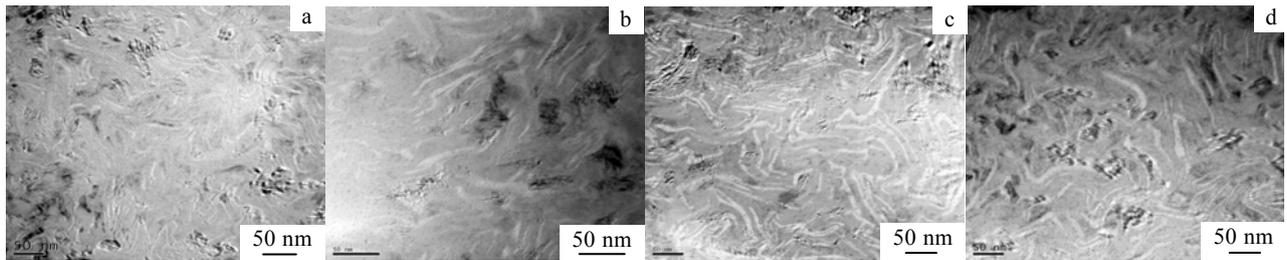


图 1 NbTi 超导线横截面透射电镜照片

Fig.1 TEM images of transverse cross section of NbTi superconducting composite wire (The thin light gray ribbons are $\alpha\text{-Ti}$. The dark, approximately equiaxed region strongly diffracting $\beta\text{-NbTi}$ grains): (a)HT1, $\varepsilon_f=4.5$; (b)HT1, $\varepsilon_f=3.6$; (c)HT2, $\varepsilon_f=3.3$; and (d)HT3, $\varepsilon_f=3.3$

表 2 最终线材微观组织及超导特性数值

Table 2 Final wire microstructure and superconducting properties						
Samples	1	2	3	4	5	6
Wire diameter /mm	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
Heat treatment	HT1	HT1	HT1	HT1	HT2	HT3
Number of heat treatment	4	4	4	4	4	5
Final drawing strain, ε_f	4.5	4.2	3.9	3.6	3.3	3.3
Average ribbon thickness/nm	2.3	2.8	3.0	3.2	5.1	4.2
Average ribbon separation/nm	11	15	18	20	25	22
Volume α -precipitate/%	24	22	20	19	24	22
J_c (5 T,4.2 K)/A	445	439	454	461	480	476
J_c (5 T,4.2 K)/A $\cdot\text{mm}^{-2}$	2854	2799	2895	2948	3068	3045

2.2 超导电性

图 2 所示为不同应变及热处理制度对 NbTi 超导线临界电流的影响。随着应变的减少，5 T, 4.2 K 下临界电流密度增加。当应变为 3.3 时， J_c 值最高达到 3068 A/mm²。

3 讨论

NbTi 超导体中， $\alpha\text{-Ti}$ 析出相属于非超导相，在 NbTi 超导体中属于有效的磁通钉扎中心。此外，NbTi 超导体的相干长度为 5 nm，磁通线直径约为 10 nm^[6]。

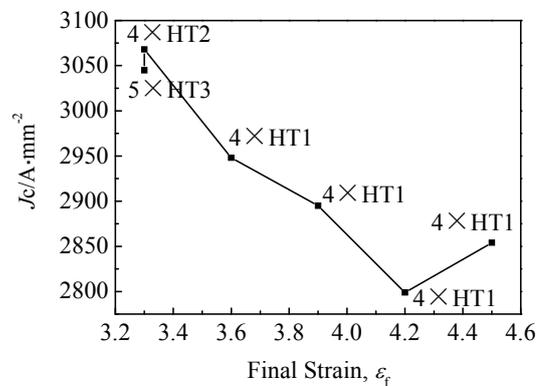


图 2 不同应变及热处理条件下临界电流密度的变化

Fig.2 Variation in critical current density (4.2 K, 5 T) with final strain and heat treatments

优化的 NbTi 超导线 $\alpha\text{-Ti}$ 析出相的名义尺寸为 5.1 nm，很接近其相干长度，按照常规的芯-芯钉扎模型，只有当钉扎中心尺寸及间距与磁通格子相匹配时，才可能产生最大的钉扎力^[6-8]。此外， J_c 值随 $\alpha\text{-Ti}$ 析出相间距的增加而增大。这主要是由于 $\alpha\text{-Ti}$ 析出相的宽度与间距成正比。因此认为， $\alpha\text{-Ti}$ 析出相的宽度是影响 J_c 的主要因素。通过时效热处理使 $\alpha\text{-Ti}$ 析出相在晶界处形成，而多次时效热处理使 $\alpha\text{-Ti}$ 析出相的数量不断增

多。但过多的热处理会使有害相形成,从而对线材的性能造成影响。但 α -Ti析出相的数量并不是影响线材性能的唯一因素。如表2所示,试样1与试样5有着同样的 α -Ti析出相数量,但是两者的 J_c 值却不同。

J_c 值随着最终附加应变的增加而减小是因为高的最终附加应变导致 α -Ti析出相宽度的减小,也就是说尺寸远离NbTi的相干长度,因为只有当钉扎中心尺寸及间距与磁通格子相匹配时,才可能产生最大的钉扎。因此合适的最终附加应变是高 J_c 的原因。

从TEM分析判断, α -Ti析出相的褶皱程度也是线材性能提高的重要因素,褶皱程度越高,线材性能就越好。

4 结 论

1) 通过多次时效热处理,使 α -Ti析出相体积占到24%。性能最优的线材 α -Ti析出相宽度约为5 nm,间距约为25 nm。

2) 优化的线材 α -Ti析出相的宽度从4.2 nm到5.1 nm。

3) 对于4.2 K下的性能:较高的时效热处理温度

有利于得到较高的 J_c 值,但过多的热处理次数不利于 J_c 值的提高; α -Ti析出相的褶皱程度是提高线材性能的重要因素,褶皱程度越高,线材性能就越好。

参考文献 References

- [1] Bottura L, Bottura L. *IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2000, 10(1): 1054
- [2] Lee P J, Larbalestier D C. *Journal of Materials Science*[J], 1988, 23: 3951
- [3] Lee P J, McKinnell J C, Larbalestier D C. *Advances in Cryogenic Engineering (Materials)*[J], 1990, 36: 287
- [4] Lee P J, Larbalestier D C. *Acta Metal*[J], 1987, 35: 2523
- [5] Meingast C, Lee P J, Larbalestier D C. *J Appl Phys*[J], 1989, 66: 5962
- [6] Meingast C, Lee P J, Larbalestier D C. *J Appl Phys*[J], 1989, 66: 5971
- [7] Larbalestier D C, West A W. *Acta Metallurgica*[J], 1984, 32: 1871
- [8] Matsushita T, Kupfer H. *J Appl Phys*[J], 1988, 63: 5048

Microstructure and Properties of NbTi Superconducting Composite Wire for ITER

Li Jianfeng¹, Zhang Pingxiang^{1,2,3}, Liu Xianghong³, Li Jinshan¹, Feng Yong³, Wang Tiancheng³,
Du Shejun³, Liu Weitao³, G. Grunblatt⁴, C. Verwaerde⁴, G. K. Hoang⁴

(1. State Key Lab of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(3. Western Superconducting Technologies Co.,Ltd, Xi'an 710021, China)

(4. ALSTOM, France)

Abstract: This paper shows the results of R&D program carried out to optimize NbTi wires for the Poloidal Field (PF) coils of ITER. The influence of heat treatment on the microstructure was investigated by using TEM to find the relations between the microstructure and the critical current densities at 4.2 K for NbTi superconducting composite wire. Typical microstructure (in transverse cross-section) shows α -Ti pinning centers dispersed within the superconducting β -NbTi matrix with strong fold and curl for the NbTi wire with high critical current density at 4.2 K. It is believed that the higher temperature is beneficial to a higher J_c value at 4.2 K, but the J_c values slightly decrease with increasing the heat treatment times.

Key words: ITER; NbTi superconducting wire; microstructure; critical current density

Biography: Li Jianfeng, Candidate for Ph. D., State Key Lab. of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-86524759, E-mail: Ljfwst@gmail.com