

新型时效热处理工艺对多芯 NbTi 超导线材 微观组织和临界电流密度的影响

郭 强^{1,2}, 张平祥^{1,2,3}, 冯 勇^{1,2}, 刘向宏^{1,2}, 李建峰^{1,2}, 闫凯鹏^{1,2}

(1. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

(2. 超导材料制备国家工程实验室, 陕西 西安 710018)

(3. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 以高均匀性 Nb47Ti 合金棒和高纯无氧铜为原材料, 制备了铜比 1.3, 630 芯的 NbTi/Cu 超导线。提出了一种新型时效热处理工艺“短时预时效热处理+高温长时间时效热处理”, 即“405 °C/3 h + 405 °C/3 h + 420 °C/20 h + 420 °C/40 h + 420 °C/80 h”工艺, 该工艺可显著提高 NbTi 超导线材的临界电流密度, 较普通热处理线材提高近 17.5%, 最高可以达到 3208 A/mm²。足够的预时效次数(2 次)才能使基体中析出足够多的 α 形核数量, 进而才能在较大的最终应变下显著提高临界电流密度。此外, 在 4.46, 5.35, 6.25 3 种预应变条件之下, 临界电流密度达到峰值的最终应变都集中在 5.0~5.2 之间, 即, 必须将最终应变控制在 5.0~5.2。

关键词: NbTi 超导线材; 临界电流密度; 时效; 预应变; 最终应变

中图分类号: TG132.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)12-4113-06

高临界电流密度 (J_c) 是超导体永恒的追求目标, 因其可以拓宽超导体的应用范围和提高超导体的市场竞争力。在传统工艺中, 获得高 J_c 的基本途径是通过时效处理和最终附加应变, 使 NbTi 超导线材中具有一定数量、一定空间位向、距离和厚度的纳米级条带状 α -Ti 钉扎中心, 当 α -Ti 的空间分布能与磁通格子相匹配时钉扎力达到最大, 临界电流 J_c 值相应的也会达到最大。

NbTi/Cu 超导线材是经过多次冷拉伸和适当的中间热处理之后得到的单芯或多芯线。在冷变形与热处理交替进行的过程中, NbTi 合金中的 α -Ti 沉淀(脱溶)相逐渐析出及变化, 从块状逐渐演变为蜿蜒的带状。这种结构由沿着拉伸方向的丝状亚晶和群集在亚晶周围的高密度位错形成的管状壁垒组成^[1,2]。 α -Ti 脱溶相的体积分数与合金中 Ti 的含量和热处理温度有关^[3]。有学者先后在研究含有细小、弥散分布的 α -Ti 脱溶相样品中获得了很高的 J_c 值。以上提到的位错缺陷和时效热处理产生的 α -Ti 脱溶相均可提高磁通钉扎力, 所以冷加工导致的晶粒细化而产生的亚胞状位错结构和 α -Ti 脱溶相, 都能有效地增大临界电流密度。减小原始晶粒尺寸, 增加冷加工断面收缩率和选取最佳的时效热处理工艺等, 都是提高 J_c 的重要途径^[1-4]。时效热处理

是 NbTi 超导线材制备过程中最为关键的工序之一, 线材的超导电性能主要是通过时效热处理获得的。合理选择热处理制度非常重要。然而影响超导电性能的参数众多, 如热处理温度、保温时间、热处理次数、热处理预应变(即第 1 次热处理之前的总应变)、热处理间隔应变(两次热处理之间的应变)、热处理最终应变(最后一次热处理之后的总应变)等, 如图 1 所示。

本研究的目的是为采用一种适用于批量化生产的时效热处理工艺使 NbTi 超导体的临界电流密度提高到比较高的水平(3200 A/mm²@5 T & 4.2 K)。

1 实 验

采用高均匀性 Nb47Ti 合金, 纯 Nb 片和高纯无氧铜制备超导线材。纯 Nb 片的作用为阻碍 Nb47Ti 合金和无氧铜之间生成 TiCu 化合物, 避免 TiCu 化合物对超导线材的加工性能和临界电流密度的影响。时效温度为 405 和 420 °C, 每次时效时间为 3, 20, 40 和 80 h, 时效总时间为 140~146 h, 时效次数为 3~5 次, 实验方案设计如表 1 所示。经最终应变变形后, 线材的直径均为 0.846 mm。采用化学称重法测量超导线材的铜比。将 1.2 m 超导线材缠绕在 TC4 合金骨架上, 测量

收稿日期: 2019-03-27

基金项目: 陕西省国际科技合作计划项目(2017KW-022)

作者简介: 郭 强, 男, 1984 年生, 博士, 高级工程师, 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018, E-mail: guoqiang@c-wst.com

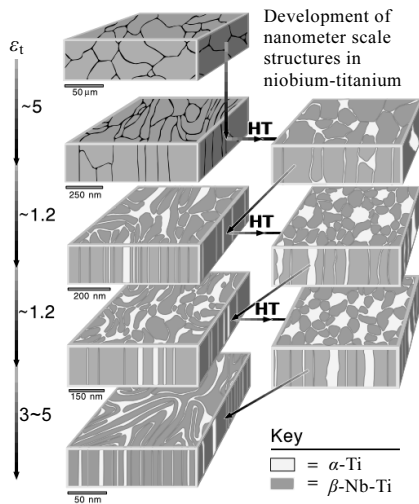


图 1 NbTi 超导体中 α -Ti 沉淀相随变形量及热处理的演变过程示意图

Fig.1 Key processing steps and microstructural changes produced by heat treatment and drawing in the manufacture of Nb-Ti superconducting strand by the “conventional” process^[3]

5, 6, 7 T 磁场下的临界电流, 判据为 $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 。通过临界电流, 铜比及线材面积计算不同磁场条件下的临界电流密度。利用透射电镜分析不同时效制度下试样中的微观组织。采用电镀的方法使线材的直径增加至 4 mm, 用线切割机切出厚度为 0.5 mm 的薄片, 然后用砂纸磨制到 $30 \mu\text{m}$, 之后采用 Gatan-600 离子减薄仪进行离子减薄。离子减薄时采用的电压为 5.5 kV, 电流 0.5 mA; 减薄角度为 $7^\circ\sim 15^\circ$ 。利用 Tecnai-30 型高分辨透射电镜 (HREM) 进行观察和分析, 操作电压为 300 kV。

采用真空氮气保护热处理 3 t 炉进行时效热处理, 装炉时, 料架下方缺口应对准电偶位置, 避免与电偶碰撞。温度和时间记录按照料温计算。时效热处理时真空小于 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 时开始加热, 炉温到达设定温度时, 保温 1 h 后向炉体充入高纯氮气, 充气压力达到 101 kPa

以上, 充气时间应控制在 30 min 以内, 以免真空系统关闭后长时间的充气过程带入空气, 造成物料氧化。

2 结果与分析

2.1 多芯 NbTi 超导线材的显微组织

为了研究时效热处理制度对超导线材临界电流密度的影响, 设计并制备了铜比 1.3, 630 芯的 NbTi/Cu 超导扁线。首先将铜比为 0.5 的 NbTi/Cu 单芯棒拉伸成型为正六边形, 对边宽度为 6.42 mm (如图 2a 所示), 之后将 NbTi/Cu 六方单芯棒进行切断矫直。加工出尺寸合适的高纯无氧铜包套以及尺寸匹配的上下盖。将 630 根 NbTi/Cu 六方单芯棒, 120 根相同尺寸的 Cu 六方棒以及插缝棒紧密排列在加工的铜包套中, 如图 2b 所示。采用真空电子束焊机将铜包套和上下盖封焊, 得到 NbTi/Cu 二次复合包套。再将得到的 NbTi/Cu 复合包套进行挤压、反复拉伸、多次时效热处理, 拉伸过程中均采用 6° 小角度模具, 每道次加工率为 $\sim 7\%$, 得到高均匀芯丝的 NbTi/Cu 超导线材, 线材头尾的铜比分别为 1.36 和 1.29。NbTi 超导体中无氧铜的作用一是作为 NbTi 超导体加工成材的基体, 二是在低温通电流时及时将热量传向冷却介质, 三是提供电流旁路。而中心部分无氧铜的另一个主要作用是防止挤压过程中挤压棒芯部产生空腔或芯丝断裂, 另一个主要目的是为提高超导体的稳定性。图 2d 是 NbTi/Cu 超导线使用硝酸腐蚀掉外层无氧铜之后的 NbTi 芯丝纵向照片, 从图中可以看到, 由于阻隔层材料 Nb 与 Cu 的固溶度非常低, 而且能与 Cu 及 NbTi 形成良好的冶金结合, 因此 NbTi 芯丝尺寸均匀, 表面光滑, 没有出现“香肠状”或“瘤状”芯丝。由于“香肠状”或“瘤状”芯丝的出现会极大地降低 NbTi 超导线的载流能力, 因此制备 NbTi 超导线时必须避免异常芯丝的出现。

2.2 短时预时效热处理对临界电流密度的影响

Gotoda 等人的研究表明^[3-6], 对于单芯 NbTi 线材, 如果最后一次时效热处理温度较高, 时效时间足够长 (通常大于 40 h), 短时低温预时效对 J_c 的提高非常

表 1 时效热处理工艺设计
Table 1 Aging heat treatment schemes

Items	Scheme 1	Scheme 2	Scheme 3	Scheme 4	Scheme 5
Pre-strain	4.46	5.35	6.25	6.25	6.25
1 st HT	405 °C/3 h	405 °C/3 h	405 °C/3 h	405 °C/3 h	420 °C/20 h
2 nd HT	405 °C/3 h	405 °C/3 h	405 °C/3 h	420 °C/20 h	420 °C/40 h
3 rd HT	420 °C/20 h	420 °C/20 h	420 °C/20 h	420 °C/40 h	420 °C/80 h
4 th HT	420 °C/40 h	420 °C/40 h	420 °C/40 h	420 °C/80 h	-
5 th HT	420 °C/80 h	420 °C/80 h	420 °C/80 h	-	-
Interval strain	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
Final strain	4.44~5.55	3.65~5.57	4~4.72	4.47~5.39	4~5.6

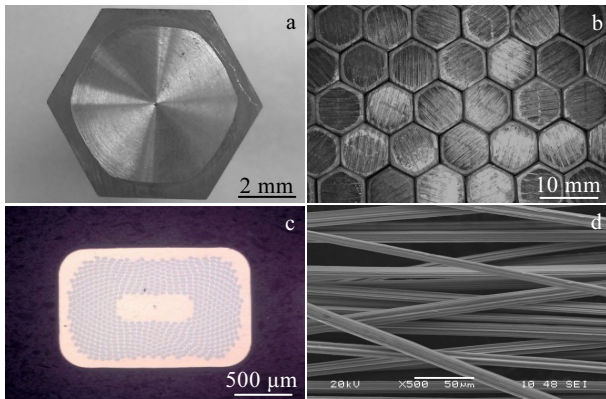


图 2 多芯 NbTi 超导线材的金相截面组织

Fig.2 Microstructures of multifilament NbTi wire: (a) monofilament bar, (b) cross section after assembling, (c) final wire, and (d) NbTi wire morphology after nitric acid corrosion

有效，并且在实验室条件下，采用这种思路的实验方案可使单芯 NbTi 线材的 J_c 提高到 3500 A/mm^2 。这种思路的基本原理是：在较大的预应变以后，将线材进行短时间时效热处理，目的是形成大量的 α 核心，这些 α 相的尺寸非常细小，处于刚刚形核的状态，而且数量非常巨大。之后再将线材在高温下多次时效热处理，形成更多体积分数的 α 析出相，特别是在最后一次热处理中，时间需要足够长。最后在比较大的最终应变下使 α 相变得非常细小，且 α 相之间的距离刚好合适，最终大幅度提高临界电流密度。采用这种思路对本实验中制备的多芯复合线进行了热处理，热处理方案如表 1 中的方案 3 所示。该种方案中预应变为 6.25，预时效热处理次数为 2 次，高温时效热处理次数为 3 次，最后一次时效热处理时间长达 80 h，最终应变为 5.1。经过该时效热处理制度后，样品 J_c 高达 3208 A/mm^2 (5 T & 4.2 K)。同时测试了采用普通时效热处理制度（分别为 2#工艺“ $350 \text{ }^\circ\text{C}/40 \text{ h}/4$ 次”和 3#工艺“ $300 \text{ }^\circ\text{C}/40 \text{ h}/4$ 次”）的线材 J_c ，分别仅为 2730 和 2450 A/mm^2 (5 T & 4.2 K)。如图 3 所示，“短时预时效热处理+高温长时间时效热处理”工艺可显著提高线材 J_c ，较普通热处理工艺线材提高近 17.5%。

图 4 给出了短时预时效热处理次数对超导线材临界电流密度的影响，预时效热处理分别为 0 次（如表 1 中的方案 5），1 次（如表 1 中的方案 4），2 次（如表 1 中的方案 3）。如图所示，当预时效热处理次数为 0 次和 1 次时，线材临界电流密度几乎不随着最终应变的增加而增加，如图 4a 和 4b。而当预时效热处理次数为 2 次时，线材临界电流密度随着最终应变的增加而增

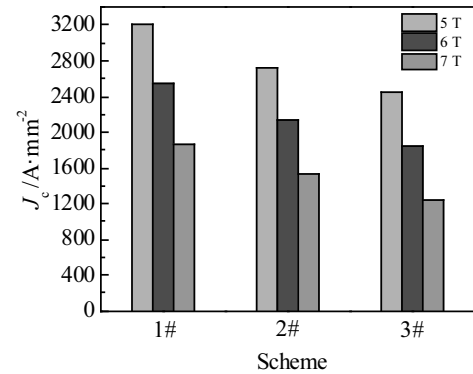


图 3 短时预时效热处理对超导线材临界电流密度的影响

Fig.3 Effect of short time pre-heat treatment on the J_c of NbTi wire

加，最终有所降低，如图 4c。这表明预时效次数显著影响临界电流密度，也就是说足够的预时效次数（2 次）才能使基体中析出足够多的 α 形核数量，进而才能在较大的最终应变下显著提高临界电流密度。

2.3 最终应变对临界电流密度的影响

最终应变是指从最后一次时效热处理后的复合体加工到最终尺寸线材时所经历的总应变。最终应变可以通过改变芯丝中钉扎中心 α 相的尺寸和间距，从而影响钉扎中心 α 相对磁通线的钉扎效果，并以此来改变线材的临界电流密度，但是过大的最终应变会造成钉扎中心 α 相的尺寸和间距过于细小，导致钉扎中心 α 相的微观结构和磁通格子不匹配，使临界电流密度降低。另外，过大的最终应变（大于 5.5）还会导致钉扎中心的尺寸小于其相干长度，使钉扎相因为混合效应而超导，导致超导线材钉扎中心的缺失，超导线材的临界电流密度降低，所以一般认为最终附加应变量为 $3\sim 5$ ^[7-9]。

图 5 给出了在不同预应变条件之下，相同时效热处理制度下（ $405 \text{ }^\circ\text{C}/3 \text{ h} + 405 \text{ }^\circ\text{C}/3 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/20 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/40 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/80 \text{ h}$ ）不同最终应变对临界电流密度的影响曲线。由图可知，预应变为 4.46 时，在 5, 6, 7 T 的测试条件下，最终应变在 5.0~5.6 的范围内，随最终应变增大， J_c 有所下降。最终应变在 5.0 时，5 T 下临界电流密度达到 3152 A/mm^2 。预应变为 5.35 时，在不同磁场的测试条件下，最终应变在 4.4~5.6 的范围内，随最终应变增大， J_c 先升高后降低。最终应变为 5.2 时达到最大，为 3046 A/mm^2 。预应变为 6.25 时，在 5, 6, 7 T 的测试条件下，最终应变在 4.2~5.3 的范围内，随最终应变增大， J_c 同样表现出先升高后降低的特点，当最终应变为 5.1 时， J_c 达到最大，为 3208 A/mm^2 。综合图 5 中所有数据可以获得以下结论，在

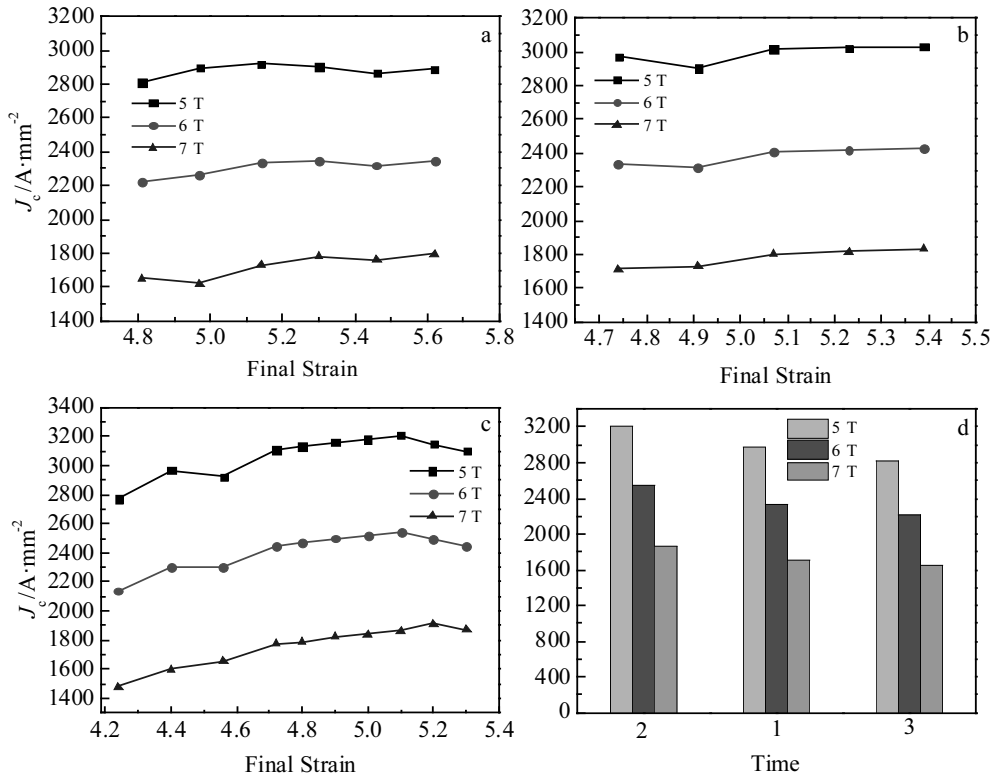


图 4 短时预时效热处理次数对超导线材临界电流密度的影响

Fig.4 Effect of short time pre-heat treatment times on the J_c of NbTi wire: (a) without pre-heat treatment, (b) one time pre-heat treatment, (c) two time pre-heat treatment, and (d) J_c comparison under the same final strain

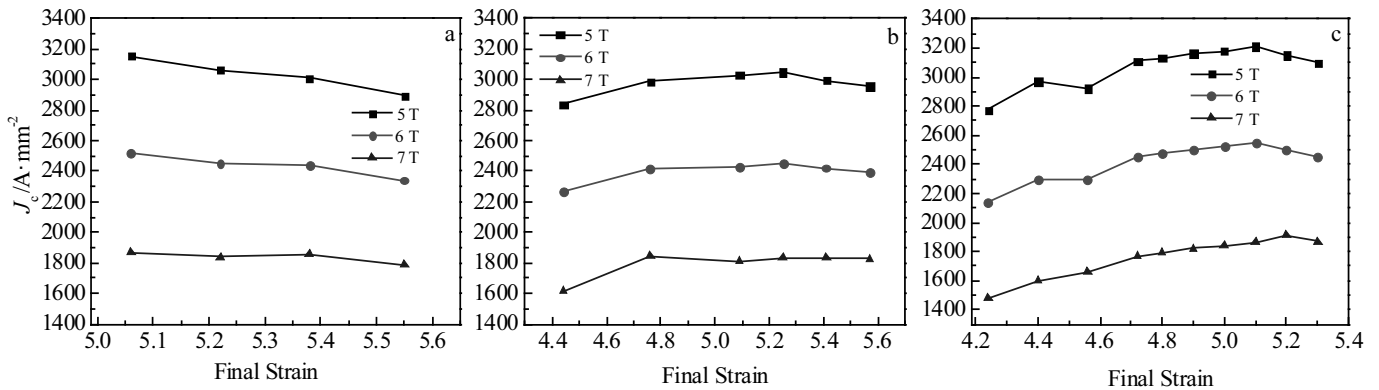


图 5 最终应变对超导线材临界电流密度的影响

Fig.5 Effect of final strain on the critical current density of NbTi wire with different pre-strains: (a) 4.46, (b) 5.35, and (c) 6.25

3 种预应变条件之下, 临界电流密度达到峰值的最终应变都集中在 5.0~5.2 之间, 即, 如果采用 “405 °C/3 h+405 °C/3 h+420 °C/20 h+420 °C/40 h+420 °C/80 h” 时效热处理制度, 必须将最终应变控制在 5.0~5.2。

2.4 预应变对临界电流密度的影响

预应变是第 1 次时效热处理前的应变, 其作用在于使 NbTi 芯丝中形成大量的位错等缺陷, 为随后的时效提供形核位置。第 1 次时效热处理之前的冷加工过程

中, β 相晶粒被拉得又细又长, 同时在细长的 β 相晶粒周围产生大量的位错, 即形成位错胞壁。细长 β 相晶粒及位错胞壁又统称为“亚带”组织或“纤维”组织。亚带上的位错密度高达 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 这样可以存储大量的应变能, 在随后热处理中极大地促使 α 相的形核^[10]。

图 6 给出了表 1 中的方案 2 和方案 3 工艺下线材的临界电流密度对比。方案 2 和方案 3 的中间时效应变、最终应变、时效温度、时效时间全部相同, 区别

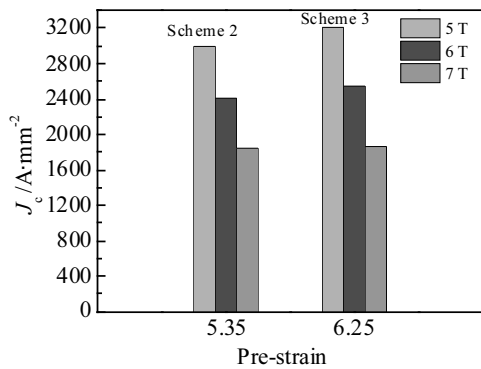


图 6 预应变对超导线材临界电流密度的影响
Fig.6 Effect of pre-strain on the J_c of NbTi wire

在于预应变不同。因此可以很直观地分析出预应变对超导线材临界电流密度的影响。在所有条件相同的情况下,预应变由 5.35 增加到 6.25 时,线材在 5 T 下的 J_c 由 2980 A/mm^2 提高到 3208 A/mm^2 , 提高了 7.7%。

2.5 时效热处理后 NbTi 超导线材的微观组织

NbTi 合金超导体通常是经过多次强冷拉伸和沉淀热处理的单芯或多芯线。典型的显微组织为有 α -Ti 脱溶的位错胞结构。这种结构由沿着拉伸方向的丝状亚晶和群聚在亚晶周围的高密度位错形成的管状壁垒组成。

位错胞结构和 α -Ti 沉淀相被认为是 NbTi 合金的重要“钉扎中心”^[10,11]。NbTi 超导体较大的冷加工变形易导致位错胞结构的形成。NbTi 超导体的冷加工变形量很大,通常的断面收缩率可达 $10^3:1$ 以上。冷加工过程中, β 相晶粒被拉得又细又长,同时在细长的 β 相晶粒周围产生大量的位错,即形成位错胞壁。细长 β 相晶粒及位错胞壁又统称为“亚带”组织或“纤维”组织。亚带上的位错密度高达 $5 \times 10^{11} cm^{-2}$ 。在冷加工初期阶段,亚带细化十分迅速,但是冷拉伸到一定程度后,亚带细化速率减慢。冷加工使样品断面收缩率达到 $10^3:1$ 之后,亚带尺寸几乎不再发生变化,在冷拉伸后进行适当沉淀热处理的线材中的亚带平均直径虽会暂时略微增大,但通过随后的冷拉伸会使亚带尺寸迅速减小。在同样的总断面收缩率下,热处理后的超导导线中的亚带不仅比未热处理的多芯线亚带宽度更小,而且排列得更加整齐,这种现象称为热处理过程中亚带的回复和软化。这种亚带的细化有利于 J_c 的提高。另外,NbTi/Cu 超导导线中的 α -Ti 沉淀相从 NbTi 基体中析出,随着冷拉伸的进行,NbTi 基体中形成又细又长的亚带。平面应变以及晶粒边界的连续性,要求晶粒相互弯曲,因此导致了 α -Ti 沉淀相转变为高密度弯曲的多带群簇。并通过不断地冷变形加工而达到

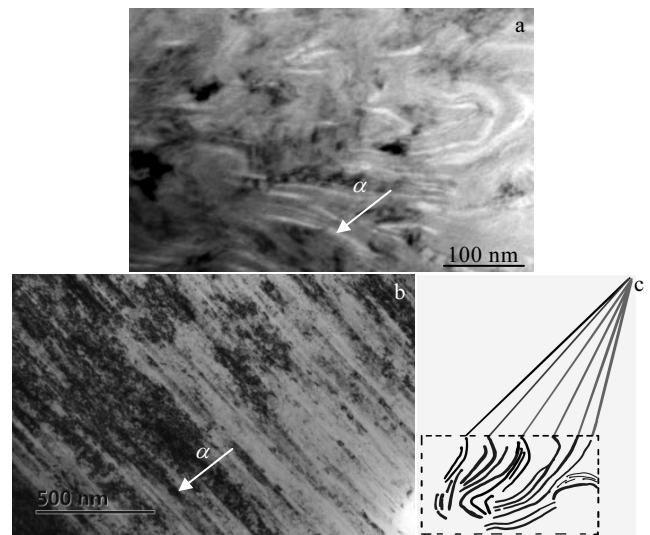


图 7 最终线材中 NbTi 芯丝的 TEM 微观组织
Fig.7 TEM images of the microstructure of NbTi filament in the final wire: (a) cross section, (b) longitudinal section, and (c) schematic illustration of 3D morphology

细带状结构,成为磁通钉扎中心^[12-14]。

图 7 是 NbTi 超导体典型的横截面和纵截面透射电镜照片。从图中可以看到,经过多次时效处理及冷变形之后,超导体中分布有大量宽厚比很大的条带状第二相,即 α -Ti 析出相。因为 α -Ti 中的 Nb 含量很少,只有 5% 以下,其平均原子序数小于 NbTi 合金的 β 相区的平均原子序数。根据电子衍射成相理论,入射电子束穿过样品时,晶格中的原子对电子束产生散射,原子序数大的重元素的原子对电子束有较大的散射能力。因而当电子束穿过具有不同原子序数的区域时,若忽略厚度差别,原子序数大的区域则有较强的衍射束和较弱的投射束,在电子衍射明场相中呈较暗的衬度;而对原子序数较小的区域,因投射束强而衍射束弱而呈较亮的衬度。从图中还可以看出,虽然 α -Ti 沉淀相形状不规则,呈弯曲的条带状,但相邻的 α -Ti 析出相之间相互平行^[15]。图 8c 是 NbTi 超导体中 α -Ti 析出相的横截面和纵截面形貌示意图。从图中可以看出,多次时效与冷加工后,在 NbTi 芯丝横截面上, α -Ti 析出相呈现宽厚比很大的弯曲的条带状,而在纵截面上呈现出纤维而平直的细长条状。可见,在 NbTi 超导体中 α -Ti 呈现宽厚比较大,长度较长的条带状分布。也正是由于这种组织的存在才使 NbTi 超导线材呈现出高的 J_c 值。

3 结 论

1) 新型的“短时预时效热处理+高温长时间时效

热处理”工艺可显著提高 NbTi 超导线材 J_c , 较普通热处理工艺线材的 2730 A/mm^2 提高近 17.5%, 最高可以达到 3208 A/mm^2 。

2) 该新型热处理工艺中, 预时效次数显著影响临界电流密度, 即足够的预时效次数 (2 次) 才能使基体中析出足够多的 α 形核数量, 进而才能在较大的最终应变下显著提高临界电流密度。

3) 该新型热处理工艺中, 在 4.46, 5.35, 6.25 三种预应变条件之下临界电流密度达到峰值的最终应变都集中在 5.0~5.2 之间, 即, 如果采用新型的“ $405 \text{ }^\circ\text{C}/3 \text{ h} + 405 \text{ }^\circ\text{C}/3 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/20 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/40 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/80 \text{ h}$ ”时效热处理制度, 必须将最终应变控制在 5.0~5.2。

参考文献 References

- [1] Cooley L D, Lee P J, Larbalestier D C. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 1991, 27(2): 1096
- [2] Kadykova G N. *Metal Science and Heat Treatment*[J], 1973, 15(2): 118
- [3] Lee P J, Larbalestier D C. *Acta Metallurgica*[J], 1987, 35(10): 2523
- [4] Gotoda H, Osamura K, Furusaka M et al. *Philosophical Magazine B*[J], 1989, 60(6): 819
- [5] Rudziak M K, Seuntjens J M, Renaud C V et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 1995, 5(2): 1709
- [6] Meingast C, Lee P J, Larbalestier D C. *Journal of Applied Physics*[J], 1989, 66(12): 5962
- [7] Guo Qiang(郭强), Li Jianfeng(李建峰), Wang Qingxiang(王庆相) et al. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*(低温物理学报)[J], 2014, 36(5): 346
- [8] Guo Qiang(郭强), Wang Qingxiang(王庆相), Liu Jianwei(刘建伟) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2015, 44(18): 203
- [9] Wang Qingxiang(王庆相), Guo Qiang(郭强), Zhu Yanmin(朱燕敏) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 43(16): 65
- [10] Li Jianfeng(李建峰). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011
- [11] Li Jianfeng(李建峰), Zhang Pingxiang(张平祥), Liu Xianghong(刘向宏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(2): 263
- [12] Potanina L, Pantsyrny V, Shikov A et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2010, 20(3): 1395
- [13] Lee P J, Larbalestier D C. *Journal of Materials Science*[J], 1988, 23(11): 3951
- [14] Stejic G, Cooley L D, Joynt R et al. *Superconductor Science and Technology*[J], 1992, 5: 176
- [15] Simon N J, Drexler E S, Reed R P. *Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures*[M]. Gaithersburg: NIST Publication, 1992: 223

Effect of New Heat Treatment on Microstructure and Critical Current Density of NbTi Superconducting Wire

Guo Qiang^{1,2}, Zhang Pingxiang^{1,2,3}, Feng Yong^{1,2}, Liu Xianghong^{1,2}, Li Jianfeng^{1,2}, Yan Kaijuan^{1,2}

(1. Western Superconducting Technologies Co. Ltd, Xi'an 710018, China)

(2. National Engineering Laboratory for Superconducting Materials, Xi'an 710018, China)

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

Abstract: NbTi/Cu wire with the low copper-to-superconductor ratio of 1.3 and filament number of 630 was prepared using highly homogenous Nb47Ti alloy bar and oxygen-free copper. A new type of aging heat treatment ($405 \text{ }^\circ\text{C}/3 \text{ h} + 405 \text{ }^\circ\text{C}/3 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/20 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/40 \text{ h} + 420 \text{ }^\circ\text{C}/80 \text{ h}$) was proposed. Compared with the traditional heat treatment, this new type heat treatment can largely improve the critical current density of NbTi superconducting wire to 3208 A/mm^2 , with an increment of 17.5%. When the pre-heat treatment times are equal to or more than 2 times, enough nucleation can be formed and critical current density can be improved obviously. In addition, critical current densities of wire under three pre-strain conditions (4.46, 5.35 and 6.25) all get the peak value when final strain is between 5.0~5.2. So, the pre-strain should be controlled between 5.0~5.2.

Key words: NbTi superconducting wire; critical current density; aging heat treatment; pre-strain; final strain

Corresponding author: Guo Qiang, Ph. D., Senior Engineer, Superconducting Material Center, Western Superconducting Technologies Co. Ltd, Xi'an 710018, P. R. China, Tel: 0086-29-86527382, E-mail: guoqiang@c-wst.com