

变形率和热处理制度对 Nb47Ti 合金显微组织的影响

张 奕, 郑永键, 唐晓东, 付宝全, 王 虎, 雷锦文

(1. 西部超导材料科技有限公司, 西安 710018; 2. 陕西省航空材料工程实验室, 西安 710018)

摘 要: 通过对比 Nb47Ti 合金在 4 种变形率和 4 种热处理制度下的显微组织。结果发现: 晶粒的生长受到热加工变形率、热处理温度等综合因素的影响, 变形率对再结晶温度影响较大; 当变形率达到 80% 以上时, 再结晶可以在较低的温度下进行, 选择合适的热处理制度, 能够获得具有细小和均匀显微组织的 Nb47Ti 合金。

关键词: Nb47Ti 合金; 显微组织; 热处理; 再结晶

中图分类号: TG146.23

文献标志码: A

Effect of deformation rate and heat treatment on microstructure of Nb47Ti alloy

ZHANG Yi, ZHENG Yong-jian, TANG Xiao-dong, FU Bao-quan, WANG Hu, LEI Jin-wen

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

2. Aeronautical Materials Engineering Laboratory of Shaanxi Province, Xi'an 710018, China)

Abstract: The microstructures of the Nb47Ti alloy under the four kinds of deformation rates and heat treatment regimes were contrasted. The results show that the deformation rate of Nb47Ti affects recrystallization temperature largely because the growth of grain is affected by the deformation rate and heat treatment regime and so on. When the deformation rate reaches above 8%, the recrystallization can occur at lower temperature, by selecting proper heat treatment regime Nb47Ti alloy with fine and uniform microstructure can be obtained.

Key words: Nb47Ti alloy; microstructure; heat treatment; recrystallization

超导材料自 20 世纪 60 年代初被发现以来得到了广泛应用, 目前, 超导材料主要应用于核磁共振成像 (MRI)、核磁共振 (NMR)、实验室仪器、粒子加速器、电力、扫雷、矿石磁分离、磁悬浮列车、超导储能 (SMEs) 等^[1]。Nb47Ti 合金是一种制备超导材料的重要原材料。组织高均匀性的超导用 Nb47Ti 合金棒材是生产性能良好的超导线材的保证。在超导材料的制备过程中, 对原材料棒材的成分和组织均匀性要求非常苛刻。目前, 国外只有美国华昌公司一家能够批量生产 Nb47Ti 合金棒材, 但该公司的制备工艺未见报道^[2]。西部超导材料科技有限公司于 2004 年 11 月组建国内唯一的超导线材生产线, 承担了目前全球规模最大的国际科研合作项目之一的国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划超导线材的生产任务, 并已经制备出高性

能的铌钛超导线材^[3]。

1 实验

1.1 试验材料

试验原材料采用西部超导材料科技有限公司生产的 Nb47Ti 合金铸锭, 化学成分见表 1 所列。

1.2 试验方法

对 Nb47Ti 合金铸锭施加 60%、70%、80% 和 90% 4 种机械热变形率, 锻造直径为 170 mm 的合金棒材。截取不同变形率下相同部位的小块试样, 对其进行 750 °C、2 h、WQ, 800 °C、2 h、WQ, 850 °C、2 h、

WQ 和 900 °C、2 h、WQ 热处理；然后将其端面进行粗磨、细磨、研磨抛光，制取金相试样；采用 HF+HNO₃+H₂O 溶液腐蚀；通过 OLYMPUS 立式金相显微镜观察分析各试样的组织。

2 结果与分析

图 1 所示为变形率为 60% 时 Nb47Ti 合金分别经不同条件热处理后的显微组织。从图 1 中可以看出，变形率为 60% 的试样经 750 °C、2 h、WQ 热处理后，试样组织仍为加工态组织，未进行再结晶(见图 1(a))；经 800 °C、2 h、WQ，850 °C、2 h、WQ 和 900 °C、2 h、WQ 热处理后，试样个别区域开始出现再结晶现象，但再结晶率较低，且晶粒随着热处理温度的升高而逐渐长大(见图 1(b)、(c)和(d))。

表 1 Nb47Ti 合金的成分

Table 1 Composition of Nb47Ti alloy (mass fraction, %)

Nb	Ti	Ni	Cu	Al	Cr	Si	Fe	Ta	C	N	O	H
Bal.	46-48	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.006	≤0.01	≤0.02	≤0.25	≤0.02	≤0.015	≤0.1	≤0.003 5

图 2 所示为变形率为 70% 时 Nb47Ti 合金经不同条件热处理后的显微组织。从图 2(a)和(b)中可以看出，经过 750 °C、2 h、WQ 和 800 °C、2 h、WQ 热处理后，试样部分区域开始出现再结晶现象；经 850 °C、2 h、WQ 和 900 °C、2 h、WQ 热处理后，变形率为 80% 试样的区域发生再结晶，但晶粒尺寸均匀性较差，且晶粒随着热处理温度的升高而逐渐长大(见图 2(c)和(d))。

图 3 所示为变形率为 80% 时 Nb47Ti 合金经不同条件热处理后的显微组织。由图 3 可看出，试样经 750 °C、2 h、WQ 热处理后，试样部分区域开始出现再结晶现象(见图 3(a))；经 800 °C、2 h、WQ 热处理后，试样 85% 的区域已经出现了再结晶，但晶粒尺寸均匀性仍然较差(见图 3(b))；经 850 °C、2 h、WQ 和 900 °C、2 h、WQ 热处理后，试样已经完全进行了再结晶，并且晶粒大小均匀(见图 3(c))；经过 900 °C、2 h、WQ

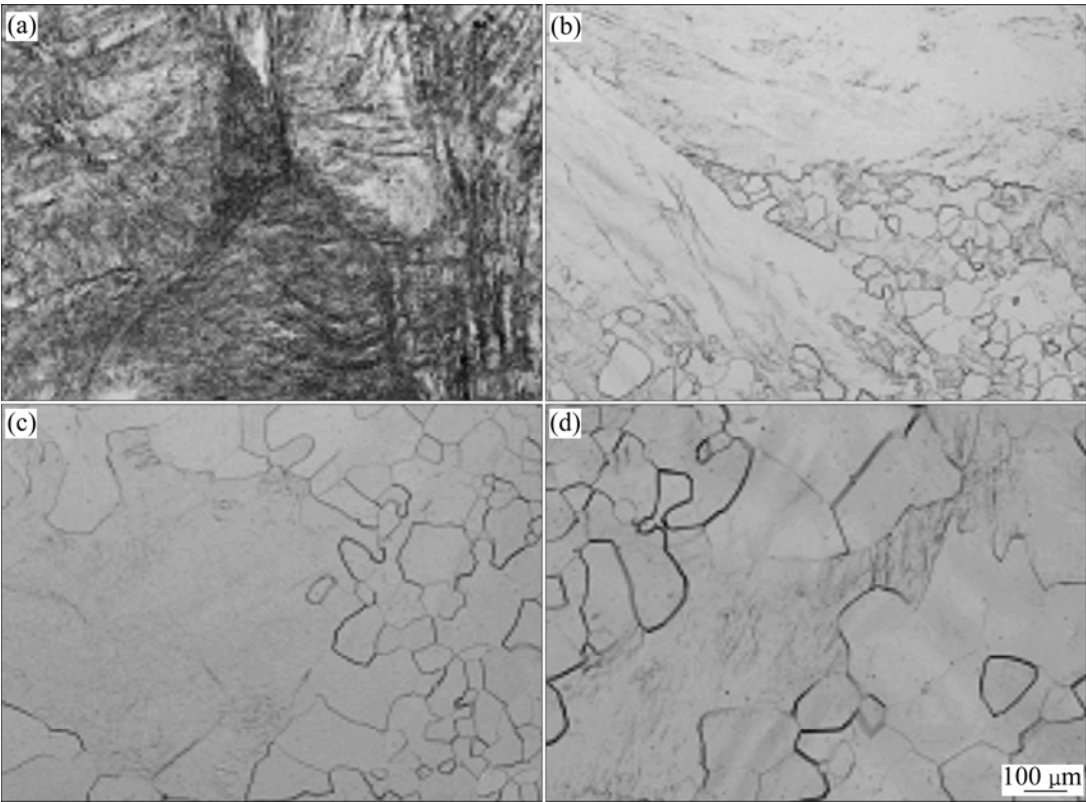


图 1 变形率为 60% 时试样在不同热处理制度下的显微组织

Fig.1 Microstructures of samples with deformation rate of 60% under different heat treatments: (a) 750 °C, 2 h, WQ; (b) 800 °C, 2 h, WQ; (c) 850 °C, 2 h, WQ; (d) 900 °C, 2 h, WQ

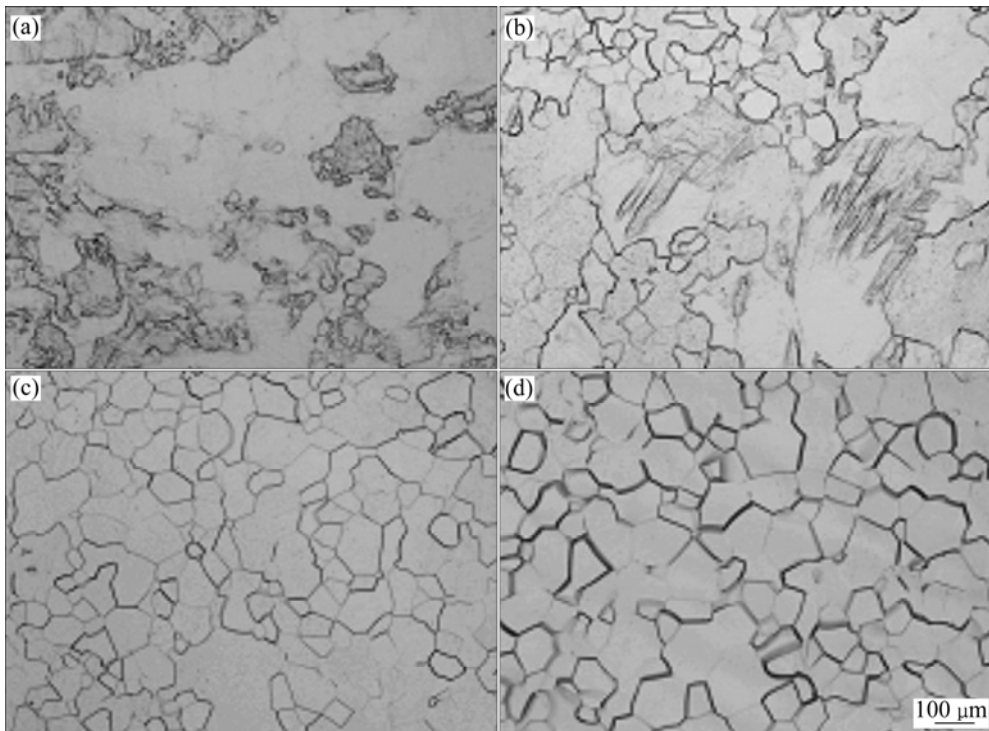


图 2 变形率为 70% 时试样在不同热处理制度下的显微组织

Fig.2 Microstructures of samples with deformation rate of 70% under different heat treatments: (a) 750 °C, 2 h, WQ; (b) 800 °C, 2 h, WQ; (c) 850 °C, 2 h, WQ; (d) 900 °C, 2 h, WQ

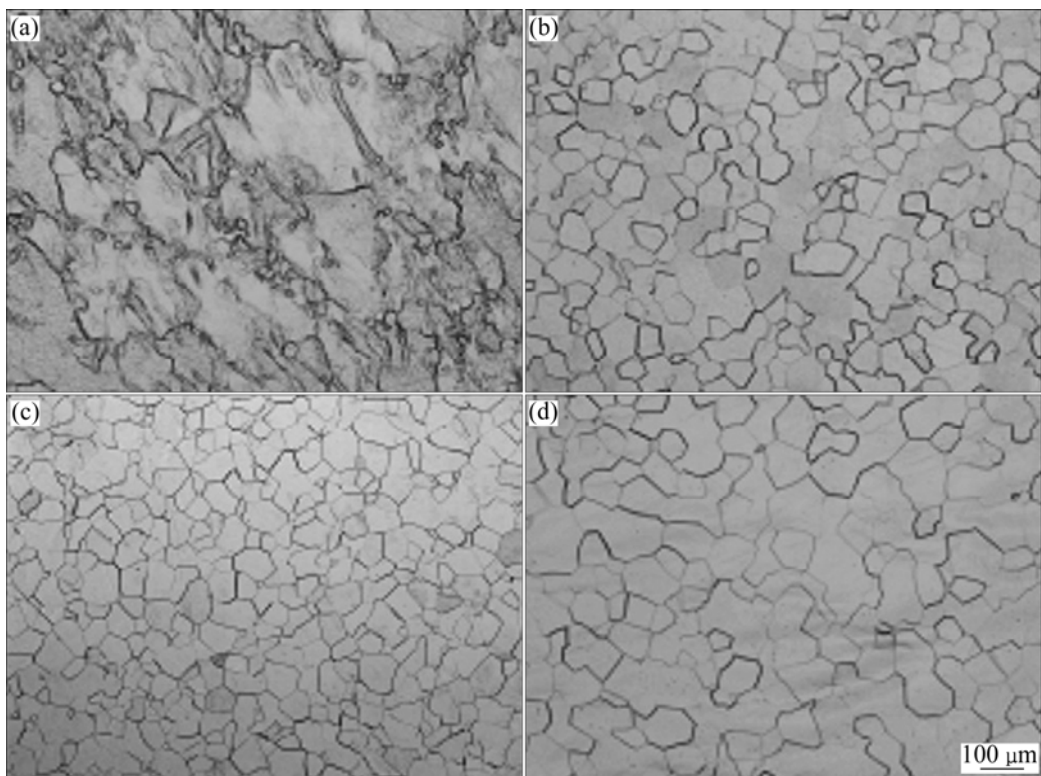


图 3 变形率为 80% 时试样在不同热处理制度下的显微组织

Fig.3 Microstructures of samples with deformation rate of 80% under different heat treatments: (a) 750 °C, 2 h, WQ; (b) 800 °C, 2 h, WQ; (c) 850 °C, 2 h, WQ; (d) 900 °C, 2 h, WQ

热处理后, 晶粒长大明显(见图 3(d))。

图 4 所示为变形率为 90% 时经不同条件热处理后的显微组织。由图 4 可看出, 试样经 750 °C、2 h、WQ 热处理后, 试样部分区域开始出现再结晶现象(见图 4(a)); 经 800 °C、2 h、WQ 热处理后, 试样 85% 的区域已经进行了再结晶, 但晶粒尺寸均匀性较差(见图 4(b)); 经 850 °C、2 h、WQ, 900 °C、2 h、WQ 热处理后, 试样已经完全进行了再结晶, 并且晶粒大小均匀(见图 4(c)); 试样经 900 °C、2 h、WQ 热处理后长大明显(见图 4(d))。

在本实验变形率范围内, 当变形率由 60% 逐渐增加到 90% 时, 随着变形率的增加, 晶粒逐渐变小, 且分布更加均匀; 随着热处理温度的升高, 再结晶程度提高, 并且晶粒逐渐长大。

根据塑性变形的相关理论, 锻造时合金坯料的加热温度高于再结晶温度, 故在变形的同时伴随着回复和动态再结晶的过程。当变形率较小时, 合金中的少数晶粒参与变形, 且其变形很不均匀, 再结晶形核优先在塑性变形引起的最大畸变处发生, 优先形核点将在竞争很小的环境中快速生长, 从而造成热处理后试样晶粒尺寸的不均匀, 随着热处理温度的升高, 再结晶形核点增多, 相邻形核点将互相制约对方的生长,

组织变形的不均匀将逐渐被减弱, 从而晶粒尺寸均匀性得到提高; 当变形率较大时, 合金中的大量晶粒发生变形, 再结晶时形成的晶核多, 形核位置也较均匀, 从而热处理后得到的晶粒尺寸差别较小。

另一方面, 根据再结晶后晶粒尺寸 d 与形核率 N 和长大速率 G 之间的关系:

$$d = A \left(\frac{G}{N} \right)^{1/4}$$

式中: A 为常数。

当变形率较小时, 虽然畸变能已能够驱动再结晶, 但由于变形程度不大, N/G 比值较小, 因此得到的晶粒尺寸较大; 当变形率增大时, 驱动形核与长大的储存能不断增大, 而且形核率增大较快, 使得 N/G 的比值增大, 因此再结晶后的晶粒被细化, 从而使合金组织得到改善^[4]。从图 3 中可以看出, 当合金的变形率达到 80% 以上时, 选择合适的热处理制度, 能够得到晶粒细小并且均匀性较好的组织。

选择不同的热处理制度对合金晶粒大小有着直接的影响, 试样在较低温度进行热处理时, 再结晶过程的能量较小, 不能提供完全再结晶所需要的能量, 只发生部分再结晶; 当热处理温度达到 850 °C 时, 再结

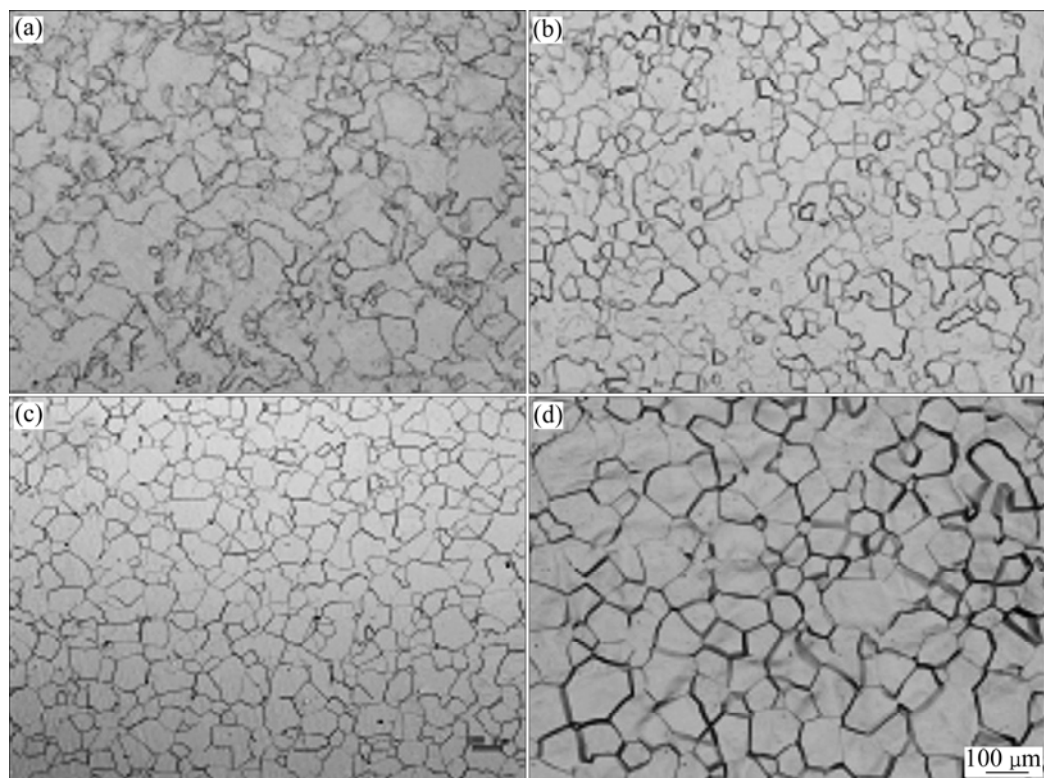


图 4 变形率为 90% 的试样在不同热处理制度下的显微组织

Fig.4 Microstructures of samples with deformation rate of 90% under different heat treatments: (a) 750 °C, 2 h, WQ; (b) 800 °C, 2 h, WQ; (c) 850 °C, 2 h, WQ; (d) 900 °C, 2 h, WQ

晶过程获得足够的能量, 合金能够完全再结晶; 当热处理温度继续再升高时, 再结晶过程获得过多的能量, 致使晶粒在完全再结晶后仍具有过多的能量使晶粒迅速长大。

变形程度会明显影响合金的再结晶温度。其原因是变形率显著提高位错密度, 而合金中 80%~90%再结晶储存能是以位错形式储存于变形金属中, 位错产生的再结晶驱动力与位错密度成正比。因而变形后的金属内部变形率越大其储存能就越高, 再结晶的驱动力也就越大^[5], 再结晶过程能在越低的温度下进行。从本实验结果可以看出, 变形率达到 80%以上时, 再结晶可以在较低的温度下进行, 说明变形率对再结晶温度影响较大。

3 结论

1) 当对 Nb47Ti 合金施加的变形率达到 80%以上时, 选择合适的热处理制度, 可以得到具有细小和均匀显微组织的 Nb47Ti 合金。

2) 晶粒的生长受到热加工变形率和热处理温度等综合因素的影响, 但变形率对再结晶温度影响较大。

3) 变形率达到 80%以上时, 再结晶可以在较低的温度下进行。

REFERENCES

- [1] 李建峰, 张平祥, 刘向宏, 李金山, 冯 勇, 王天成, 杜社军, 刘维涛. 磁体用 NbTi 超导体的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(2): 90-93.

- LI Jian-feng, ZHANG Ping-xiang, LIU Xiang-hong, LI Jin-shan, WANG Tian-cheng, DU She-jun, LIU Wei-tao. Research Advances in NbTi superconduct for magnet application [J]. Materials Review Issn, 2009, 23(2): 90-93.
- [2] 刘向宏, 周 廉, 吴晓祖. NbTi 超导体的新进展[J]. 钛工业进展, 2000, 5: 1-6.
- LIU Xiang-hong, ZHOU Lian, WU Xiao-zu. The new progress NbTi superconductors [J]. Titanium Industry Process, 2000, 5: 1-6.
- [3] 李建峰, 张平祥, 刘向宏, 李金山, 冯 勇, 王天成, 杜社军, 刘维涛. ITER 用 NbTi 超导线材微观组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 2(2): 263-265.
- LI Jian-feng, ZHANG Ping-xiang, LIU Xiang-hong, LI Jin-shan, FENG Yong, WANG Tian-cheng, DU She-jun, LIU Wei-tao. Microstructure and properties of NbTi superconducting composite wire for ITER [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 2(2): 263-265.
- [4] 王 富, 张丰收, 赖运金, 张 维, 侯艳荣, 史蒲英, 刘向宏. 变形率对 Ti6Al4VELI 合金组织与性能的影响[J]. 材料导报网刊, 2009, 4(3): 13-15.
- WANG Fu, ZHANG Feng-shou, LAI Yun-jin, ZHANG Wei, HOU Yan-rong, SHI Pu-ying, LIU Xiang-hong. Effects of deformation on microstructure and performance of Ti6Al4VELI alloy [J]. Materials Review, 2009, 4(3): 13-15.
- [5] 周 伟, 陈 军, 赵永庆, 曲恒磊, 冯 亮, 郭荻子. 钽钛合金再结晶退火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(20): 61-63.
- ZHOU Wei, CHEN Jun, ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, FENG Liang, GUO Di-zi. Study on recrystallization anneal technology of Ta-Ti alloy [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(20): 61-63.

(编辑 李艳红)