

TB8 钛合金板材再结晶动力学

周 伟, 辛社伟, 葛 鹏, 李 倩, 陈 军

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 对 TB8 合金冷轧板材在 770~820 °C 温度范围内的再结晶动力学研究表明: 试验用 TB8 钛合金冷轧板材的再结晶最佳退火温度为 790~810 °C。采用 Avrami 方程可以较好的描述冷轧 TB8 合金板材退火过程的再结晶情况。800 °C 退火处理动力学拟合方程为: $\ln \ln [1/(1-x(t))] = -2.38 + 0.86 \ln t$ 。由实验数据计算得到合金再结晶激活能为 102.87 kJ/mol。

关键词: 钛合金; 再结晶; 激活能

中图分类号: TG 146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)06-1531-03

TB8(对应国外 β 21S)钛合金是一种具有优异成形性、深淬透性和良好的抗腐蚀能力的亚稳定 β 型高强度钛合金, 可用于制作有温度要求的飞机结构件或发动机结构件、紧固件等, 具有广泛的应用前景^[1-5]。

钛合金中板材的静态再结晶行为是制定板材固溶处理规范的重要环节, 因此, 研究板材再结晶规律是控制板材质量和提高其使用性能的关键。作者通过退火处理实验推导 TB8 钛合金再结晶过程的动力学方程, 计算得到再结晶激活能以及再结晶动力学曲线, 为制定合金退火处理工艺提供参考。

1 实 验

试验选用冷轧变形量为 40% 的 $\delta 3$ mm TB8 合金板材。其成分(质量分数, %)为 Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si-0.008Fe-0.08O-0.03C-0.001H-0.01N。其加工态显微组织见图 1。从冷轧板上直接切取若干尺寸为 3 mm×15 mm×15 mm 的试样。再结晶退火试验在箱式电阻炉中进行, 试验温度选择 770, 780, 790, 800, 810, 820 °C, 保温时间为 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120 min。用 OLYMPUS 光学电子显微镜观察显微组织, 并测定不同温度退火时再结晶体积分数。

2 结果与分析

2.1 再结晶特征

770 °C 不同时间的退火处理, 合金的显微组织仍保持轧制后的纤维状特征, 可以认为没有发生再结晶。780 °C 退火保温 2 h 后才可观察到少量的再结晶晶粒, 此再结晶过程是通过点缺陷和位错的重排或部分消失

而实现的^[6], 因此再结晶孕育时间比较长。随着退火温度的提高, 再结晶形核孕育时间急剧减少。图 2 为合金不同温度下退火后的再结晶组织。可以看出, 790~810 °C 范围内, 在退火初期 (≤ 10 min), 合金再结晶迅速, 退火保温试样在很短的时间内再结晶率已超过 20%, 且随温度的升高而加快; 这是由于再结晶过程是通过原子扩散来实现的, 温度越高, 原子活性越大, 其扩散速率越快^[7]。随着时间的延长, 再结晶含量增加, 但再结晶速率则变缓。合金板材在不同退火条件下的再结晶情况见表 1。

2.2 再结晶动力学

应用 Avrami 方程来描绘再结晶动力学^[8]:

$$x(t) = 1 - \exp(-Kt^n) \quad (1)$$

式中, x 是再结晶分数, t 是退火时间(min), K 是常数。对方程 (1) 两边取对数得:

$$\ln \ln [1/(1-x(t))] = -2.38 + 0.86 \ln t$$

$$\ln \ln [1/(1-x(t))] = \ln K + n \ln t \quad (2)$$

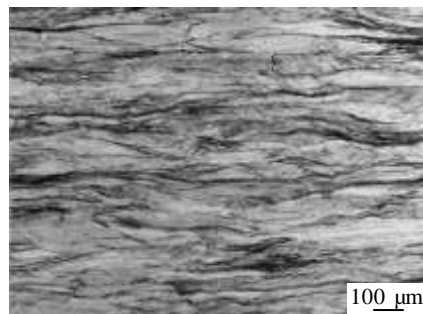


图 1 冷轧 TB8 合金板材显微组织

Fig.1 Initial microstructure of cold-rolled TB8 alloy plate

收稿日期: 2015-06-23

基金项目: 陕西省科技统筹项目 (2014KTCQ01-38)

作者简介: 周 伟, 女, 1978 年生, 硕士, 高级工程师, 西北有色金属研究院钛合金研究所, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231078, E-mail: zhouwei2002563@163.com

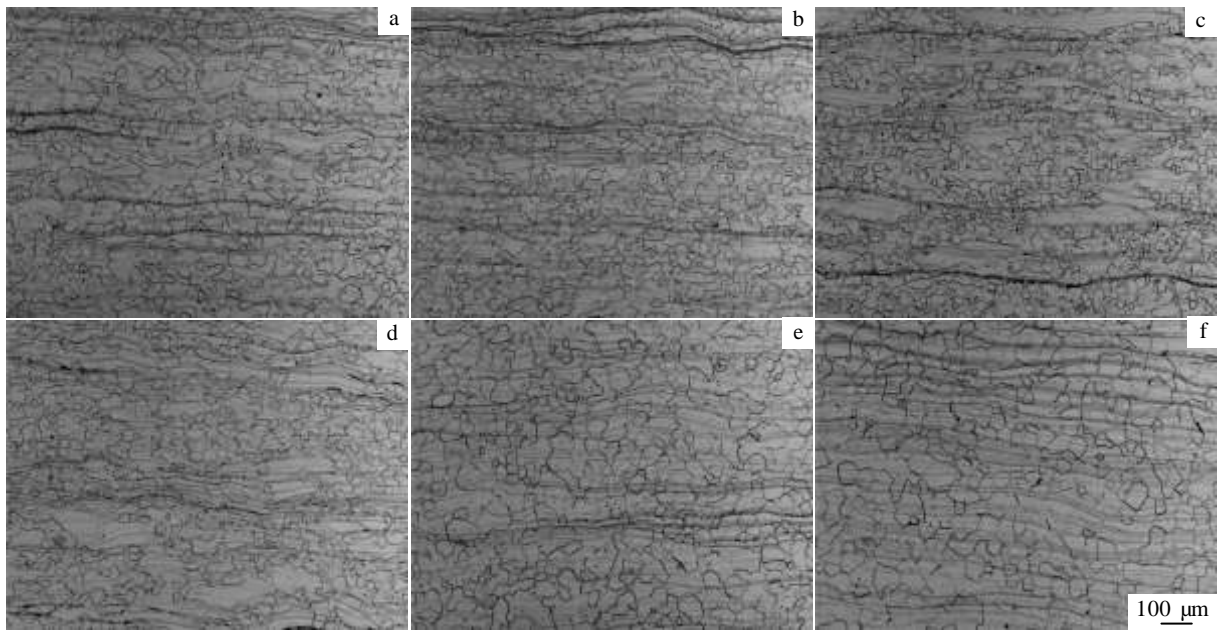


图 2 合金退火处理后的显微组织

Fig.2 Microstructures of the alloy with different annealing parameters: (a) 790 °C, 10 min; (b) 810 °C, 5 min; (c) 800 °C, 5 min; (d) 800 °C, 10 min; (e) 800 °C, 30 min; and (f) 800 °C, 60 min

表 1 合金板材不同退火条件下的再结晶体积分数

Table 1 Recrystallization volume fraction of TB8 cool stroll plate at various annealing conditions (%)

T/°C	t/min						
	5	10	20	30	60	90	120
770	-	-	-	-	-	-	5.22
780	-	-	-	-	-	11.5	19.5
790	23.2	36.5	56.1	70.6	89	95.5	-
800	32.3	47.8	68.9	81.2	96.5	-	-
810	40.6	53.1	75.5	90.6	98.6	-	-
820	99	-	-	-	-	-	-

本实验中在800 °C退火处理时间与再结晶体积分数的关系见图3。

结合式(2)，可以得到800 °C再结晶 $\ln \ln [1/(1-x(t))] - \ln t$ 图，见图4。可以看出， $\ln \ln [1/(1-x(t))] - \ln t$ 之间具有良好的线性关系，说明采用Avrami方程可以较好的描述冷轧TB8合金板材退火处理的静态再结晶过程。拟合方程为：

$$\ln \ln [1/(1-x(t))] = -2.38 + 0.86 \ln t \quad (3)$$

2.3 再结晶激活能

在等温退火过程中，退火温度 T 和退火时间 t 符合的Arrhenius方程^[9]：

$$1/t = A \exp(-Q/RT) \quad (4)$$

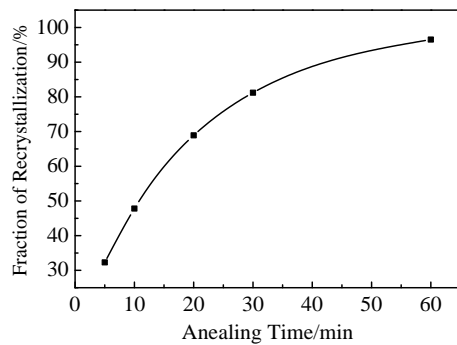


图3 TB8合金800 °C退火再结晶体积分数与时间的关系

Fig.3 Relationship between fractions of recrystallization and annealing time for TB8 alloy annealed at 800 °C

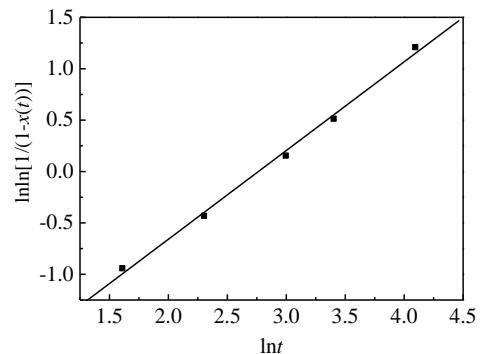


图4 合金800 °C退火的 $\ln \ln [1/(1-x(t))] - \ln t$ 图

Fig.4 $\ln \ln [1/(1-x(t))] - \ln t$ curves of TB8 alloy annealed at 800 °C

式中, Q 为再结晶激活能, T 为绝对温度, R 为气体常数, t 为产生一定量再结晶晶粒体积分数所需时间。

由不同温度下完成相同再结晶晶粒体积分数所需时间的比值就可以得到材料的再结晶激活能:

$$Q = (\ln t_1 - \ln t_2)RT_1T_2 / (T_2 - T_1) \quad (5)$$

在 790 °C 退火时间为 20 min 时的再结晶体积分数为 56.1%, 由拟合方程 (3) 计算出 800 °C 相应再结晶体积分数所需时间为 12.7 min, 通过公式 (5) 即求得再结晶激活能 Q 为 102.87 kJ/mol。同时得到各温度下的再结晶动力学曲线如图 5 所示。此曲线可为制定 TB8 合金板材退火处理工艺提供参考。

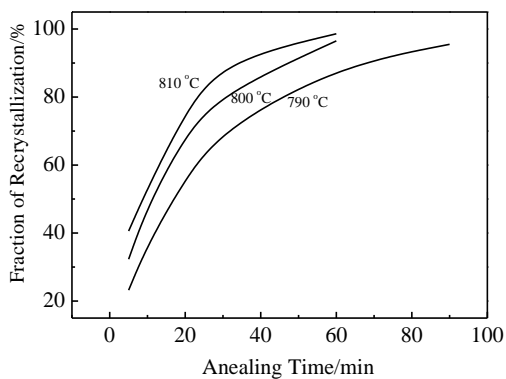


图 5 合金再结晶动力学曲线

Fig.5 Recrystallization kinetic curves of TB8 alloy

3 结 论

1) 退火温度较低时, 再结晶过程缓慢, 所需时间较长。随着退火温度的提高, 发生再结晶所需要的时间减少。从节约成本方面考虑本试验用 TB8 钛合金冷轧板材的再结晶最佳退火温度为 790~810 °C。

2) 采用 Avrami 方程可以较好的描述冷轧 TB8 合金板材退火处理的静态再结晶过程。800 °C 退火处理拟合方程为: $\ln \ln [1/(1-x(t))] = -2.38 + 0.86 \ln t$ 。

3) 应用 Arrhenius 方程, 结合实验数据计算得到合金再结晶激活能为 102.87 kJ/mol。

参考文献 References

- [1] Zhu Zhishou(朱知寿), Wang Qingru(王庆如). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(Z1): 414
- [2] Zhu Liyun, Xie Tian, Zhang Hong. *Academic Communication*[J], 2013, 10: 41
- [3] Ye Wenjun(叶文君), Quan Guiyi(全桂彝). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(Z1): 302
- [4] Zhou Xiaohu, Ma Wenge, Yu Hanqing et al. *Journal of Plasticity Engineering*[J], 2003, 8: 37
- [5] Li Ping, Jiang Zheng, Yuan Baoguo et al. *Journal of Plasticity Engineering*[J], 2012, 19(6): 15
- [6] Zhang Huangqiang(张黄强), Xu Guang(徐光), Zhang Xinqiang(张鑫强) et al. *Journal of Wuhan University of Science and Technology, Natural Science Edition*(武汉科技大学学报, 自然科学版)[J], 2007, 30(6): 574
- [7] Peng Conghui(彭聪辉), Chang Hui(常辉), Hu Rui(胡锐) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2011, 31(2): 8
- [8] Su Xiao(苏晓), Gao Yongjun(高永军), Ren Baojiang(任宝江) et al. *Shanghai Metals*(上海金属)[J], 2012, 34(6): 7
- [9] Wang Junfeng(王俊峰), Jia Shuguo(贾淑果), Chen Shaohua(陈少华) et al. *Journal of Henan University of Science and Technology, Natural Science*(河南科技大学学报, 自然科学版)[J], 2012, 33(1): 5

Recrystallization Kinetics of TB8 Titanium Alloy Plate

Zhou Wei, Xin Shewei, Ge Peng, Li Qian, Chen Jun

(Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The recrystallization kinetics during annealing process of cold-rolled TB8 alloy plate was investigated. The results show that the optimum annealing temperature of the test material is from 790 to 810 °C. The relationship between annealing time and volume fraction of the recrystallized grains at 800 °C can be described by the Avrami equation of $\ln \ln [1/(1-x(t))] = -2.38 + 0.86 \ln t$. Based on the kinetics analysis of recrystallization process, the activation energy is calculated to be 102.87 kJ/mol.

Key words: titanium alloy; recrystallization; activation energy

Corresponding author: Zhou Wei, Master, Senior Engineer, Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: zhouwei2002563@163.com