

Ti-5553 合金热变形时动态再结晶的临界条件

周伟, 葛鹏, 李倩, 辛社伟, 陈军

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 对 Ti-5553 合金在变形温度 800~860 °C、应变速率 0.1~10 s⁻¹ 条件下进行热压缩试验, 分析了应力-应变曲线, 推导出加工硬化率 θ 与临界应变 ε 的关系曲线, 应用曲线的拐点判据得到了合金在不同条件下变形发生动态再结晶的临界应变值。应用 Sellarsn 模型建立了合金发生动态再结晶的临界变形条件。

关键词: Ti-5553 合金; 热压缩变形; 动态再结晶; 临界应变

中图分类号: TG146.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)07-1732-04

近 β 型钛合金 Ti-5553 具有比强度高、断裂韧性好、淬透性高、热加工工艺性能和机加工性能优异等特点, 可满足高结构效益、高可靠性结构件的使用要求, 在航空航天工业中日益受到青睐^[1-3]。

金属高温变形符合一定临界条件后, 可出现能够完全消除晶粒内部加工硬化的动态再结晶过程, 确定其发生的临界条件具有重要的实际意义。本研究在 Gleeble-1500 热模拟试验机上对 Ti-5553 合金进行等温压缩试验, 利用获得的应力-应变曲线数据绘制加工硬化率曲线图, 通过 $\ln\theta$ - ε 曲线上拐点及 $-\partial(\ln\theta)/\partial\varepsilon$ 曲线上最小值, 确定发生动态再结晶的临界应变值。同时, 应用 Sellarsn 模型建立了合金发生动态再结晶的临界变形条件。

1 实验

试验材料为 Ti-5553 合金棒材, 其化学成分如表 1 所示。将其加工成 $\Phi 8$ mm \times 12 mm 圆柱试样。在热压缩试验在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行, 变形温度为 800, 820, 840, 860 °C, 应变速率为 0.01, 1, 10 s⁻¹, 变形量为 60%。计算机自动完成相关数据的采集。

2 结果与讨论

2.1 动态软化曲线

Ti-5553 合金等温压缩时的真应力-真应变曲线见

表 1 Ti-5553 合金主要化学成分

Table 1 Chemical compositions of Ti-5553 alloy ($\omega/\%$)

Al	Mo	V	Cr	Fe	N	H	O	Ti
5.14	5.38	5.06	3.02	0.43	0.009	0.002	0.09	Bal.

图 1。可见, 合金变形初期, 随着应变的增加应力呈直线关系急剧上升, 并迅速达到最高峰值, 出现明显的加工硬化特征。相同温度下, 不同应变速率变形后峰值应力差值较大, 例如, 820 °C 变形, 应变速率为 0.1 s⁻¹ 时, 峰值应力为 167.25 MPa, 应变速率为 1 s⁻¹ 时, 峰值应力升高至 232.55 MPa, 当应变速率为 10 s⁻¹ 时, 峰值应力为 321.83 MPa, 说明应变速率对合金动态软化影响较大。应变速率相同时, 随着变形温度的提高, 峰值应力差值较小。例如, 变形速率为 1 s⁻¹ 时, 820 和 860 °C 变形应力峰值差值为 57.24 MPa, 变化幅度为 24.6%, 说明变形温度对合金动态软化效果较小。在同一变形温度下, 变形速率较低时的流变曲线较为光滑, 而变形速率较高时曲线出现锯齿状波形, 此为不连续动态屈服现象^[4-6]。

2.2 动态再结晶临界条件

欧阳德来和黄光杰等认为动态再结晶在 $\ln\theta$ - ε (加工硬化率 $\theta = d\sigma/d\varepsilon$) 曲线的拐点处发生^[7,8], 因此通过加工硬化率来预测动态再结晶发生的临界应变。不同变形条件下的 $\ln\theta$ - ε 关系曲线见图 2。可以看出, 随着应变的增加, 加工硬化率快速降低, 随后进入缓慢降低的阶段。曲线在缓慢降低阶段出现拐点, 此拐点值即为临界应变。为了精确确定曲线的拐点值, 对 $\ln\theta$ - ε 曲线求一阶偏导 $\partial(\ln\theta)/\partial\varepsilon$ 可得 $\partial\ln\theta/\partial\varepsilon$ - ε 的关系曲线, 如图 3 所示。曲线上出现的最小值即为动态再结晶临界应变。本试验条件下的临界应变值如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 应变速率相同时, 材料的临界

收稿日期: 2015-07-23

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

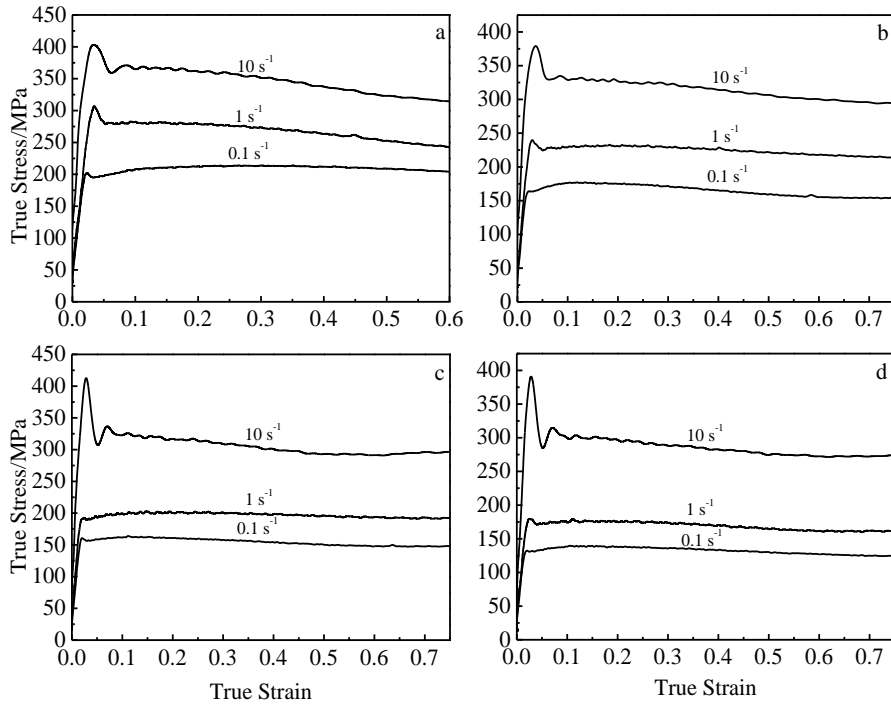


图 1 不同变形温度下 Ti-5553 合金的真应力-真应变曲线

Fig.1 True stress-true strain curves of Ti-5553 alloy at different deformation temperatures: (a) 800 °C, (b) 820 °C, (c) 840 °C, and (d) 860 °C

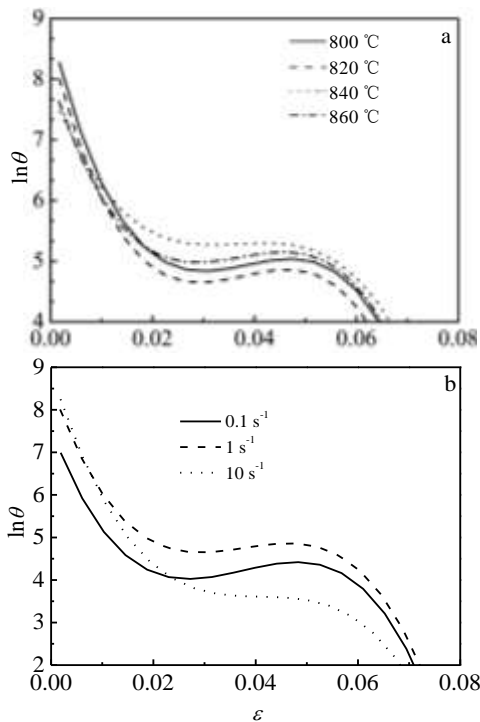


图 2 Ti-5553 合金 lnθ-ε 曲线

Fig.2 Curves of lnθ-ε for Ti-5553 titanium alloy: (a) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ and (b) $T = 820 \text{ }^\circ\text{C}$

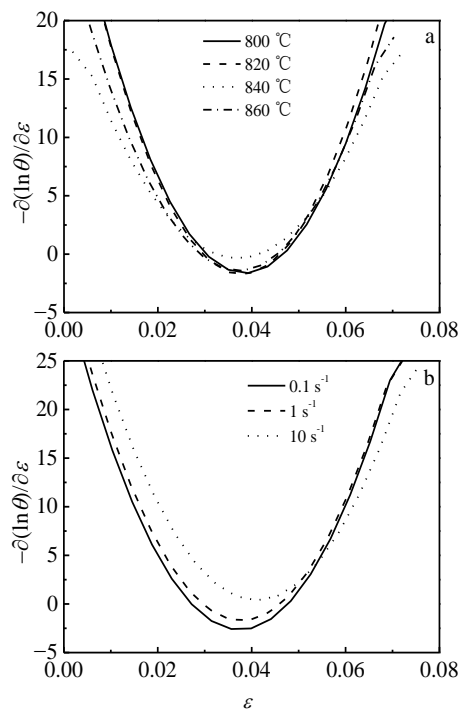


图 3 Ti-5553 合金的 $\partial \ln \theta / \partial \epsilon$ 与 ϵ 的关系曲线

Fig.3 Relationship between $\partial \ln \theta / \partial \epsilon$ and ϵ for Ti-5553 alloy: (a) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ and (b) $T = 820 \text{ }^\circ\text{C}$

应变值随变形温度的升高而减小；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^[9]。变形温度相同时，临界应变值随着应变速率的提高而增大。提高应变速率，金属

表 2 不同变形条件下的 Ti-5553 合金临界应变值
Table 2 Critical strain value of Ti-5553 alloy during different deformations

Temperature/°C	0.1 s ⁻¹	1 s ⁻¹	10 s ⁻¹
800	0.0359	0.0392	0.051
820	0.0357	0.0394	0.041
840	0.04	0.039	0.048
860	0.0346	0.038	0.044

内部位错密度急剧增大且得不到释放，抑制了动态再结晶的形核速率^[10]。由表 2 同时还发现应变速率对合金发生动态再结晶的临界应变影响较变形温度大，与应力-应变曲线的结论相吻合。

采用 Sellarsn 模型^[11]分析变形温度和变形速率对合金再结晶临界应变的影响。

$$\epsilon_c = aZ^b \tag{1}$$

式中：a, b 为常数；Z 为 Zener-Hollomon 参数。

根据 $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ ， $Q=611 \text{ kJ/mol}$ ^[12]计算不同变形条件下的 Z 值。

根据所得到的不同变形条件的临界应变值及相对应的 Z 值，绘制 $\ln \epsilon_c$ 和 $\ln Z$ 的关系曲线，见图 4。对曲线进行线性回归可以得到：

$$\ln \epsilon_c = 0.0077 \ln Z - 4.225 \tag{2}$$

因此确定合金发生动态再结晶的临界条件为：

$$\epsilon_c = 1.46 \times 10^{-2} Z^{0.0077} \tag{3}$$

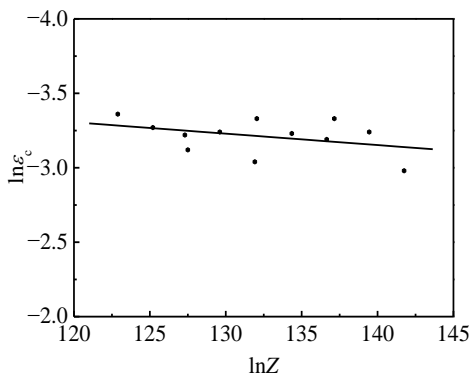


图 4 Ti-5553 合金临界应变与 Z 参数关系

Fig.4 Diagram of the critical strain ϵ_c and Z parameter for Ti-5553 alloy

3 结 论

1) 应变速率对合金动态软化影响较大，对变形温

度的影响较小。在同一变形温度下，随着应变速率的提高，变形过程中存在不连续动态屈服现象。

2) 利用热压缩试验数据推到的加工硬化率与临界应变的关系曲线存在拐点，利用此拐点判据，可以确定试验条件下材料发生动态再结晶的临界应变。

3) 采用 Sellarsn 模型得到合金在试验条件下发生动态再结晶的临界变形条件为： $\epsilon_c = 1.46 \times 10^{-2} Z^{0.0077}$

参考文献 References

[1] Wagner V, Baili M, Dessein G et al. *Engineering Materials*[J], 2010, 446: 147

[2] Warchomicka F, Stockinger M, Degischer H P. *Ti-2007 Science and Technology*[C]. Kyoto: The Japan Institute of Metals, 2007

[3] Jones N, Jackson M, Dye D et al. *Ti-2007 Science and Technology*[C]. Kyoto: The Japan Institute of Metals, 2007

[4] Li L X, Lou Y, Yang L B et al. *Materials and Design*[J], 2002, 23: 451

[5] Jones N G, Dashwood R J, Dye D et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 499: 369

[6] Li L X, Lou Y, Yang L B et al. *Materials and Design*[J], 2002, 23: 451

[7] Ouyang Delai(欧阳德来), Lu Shiqiang(鲁世强), Cui Xia(崔霞) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(8): 17

[8] Huang Guangjie(黄光杰), Qian Baohua(钱宝华), Wang Lingyun(汪凌云) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(12): 2080

[9] 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

[10] Quan Guozheng(权国政), Zhao Lei(赵磊), Zhang Yanwei(张艳伟) et al. *Function Materials*(功能材料)[J], 2012, 43(2): 222

[11] Tao Lin(陶琳), Cheng Ming(程明), Song Guangsheng(宋广胜) et al. *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2012, 4(2): 85

[12] Zhou Wei(周伟), Ge Peng(葛鹏), Zhao Yongqing(赵永庆) et al. *Proceedings of the 12th World Conference on Titanium* (第 12 届世界钛会)[C]. Beijing: China National Convention Center, 2010

Critical Conditions for Dynamic Recrystallization of Ti-5553 Alloy during Hot Deformation

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

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

Abstract: Hot compression tests of Ti-5553 titanium alloy were conducted at deformation temperature of 800~860 °C and strain rates of 0.1~10 s⁻¹. The relationship curve of work hardening rate θ and critical strain ε was deduced according to true stress-true strain curves. The critical conditions of dynamic recrystallization of Ti-5553 alloy were studied with the inflection point criterion of curves. The critical condition of dynamic recrystallization was obtained using the mode of Sellarsn.

Key words: Ti-5553 alloy; hot compression deformation; dynamic recrystallization; critical strain

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