

钛合金组织特征参数与拉伸性能预测

张旺峰, 曹春晓, 李兴无, 马济民, 朱知寿

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 研究了 TA15 钛合金 β 区热变形时, 变形温度、变形量、变形速率、冷却方式等工艺参量对片状组织特征参数 β 晶粒尺寸 D 、 α 集束尺寸 d 、 α 片厚 b 的影响, 以及片状组织特征参数与力学性能的关系。利用多元回归分析得到了强度、塑性与 3 个特征参数 D 、 d 、 b 的定量关系式, 通过这种定量关系可以预测力学性能。

关键词: 钛合金; 组织特征参数; 定量关系; 性能预测

中图分类号: TG146.2⁺3; TG111.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)06-0972-04

钛合金由于具有比强度高、抗腐蚀能力强等优点, 成为航空、航天的主要结构材料^[1,2], 钛合金也应用于能源、化学等工业^[3]。众所周知, 钛合金组织具有多样性, 但影响性能的因素往往是几个关键性的特征量, 称之为组织特征参数。钛合金的组织可分为 3 类^[4]: 等轴组织、片状组织及双态组织。已有的研究表明^[5-9], β 热变形或 β 热处理得到的片状组织除了塑性有所降低外, 其他指标如断裂韧性、裂纹扩展速率等损伤容限以及蠕变、持久性能均比等轴、双态组织要好。因此, 为适应损伤容限设计的要求, 研究片状组织的特征参数对强度、塑性的影响规律, 以期达到发挥片状组织的性能优势, 避免其塑性偏低的缺点, 具有重要的意义。

片状组织特征参数主要包括 β 晶粒尺寸 D 、 α 集束尺寸 d 、 α 片厚 b , 这些参数影响裂纹萌生、裂纹扩展过程, 从而影响断裂韧性、裂纹扩展速率, 而这些特征参数取决于工艺参量。因此, 研究特征参数的变化规律对合理制定热工艺具有重要的指导作用。本实验主要研究 β 区热变形后得到的片状组织特征参数对力学性能影响的基本规律, 从而确定他们之间的定量关系。研究结果不仅能确定钛合金最佳的片状组织特征参数, 而且可以达到利用特征参数预测性能的目的。

1 实验

研究材料选用近 α 型 TA15 钛合金, 其化学成分 (质量分数, %) 为: Al6.3, Zr1.97, Mo1.4, V1.4, 其余为 Ti。该合金的主要特点是具有中等的室温强度和高温强度, 良好的热稳定性和焊接性能, 主要用于

飞机及发动机承力构件。

热工艺对组织特征参数的影响通过热模拟试验进行, 试样为 $\phi 12 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 的拉伸试样, 试验用 Gleeble 1500 热力模拟试验机。试样在不同的变形、冷却及热处理后, 沿轴向剖开进行组织观察与参数测定, 力学性能测试也用热模拟后的试样。显微组织观察用 Neophot-21 和 DMRE/E 光学显微镜和图像分析仪 (Leica)。组织特征参数 β 晶粒尺寸 D 、 α 集束尺寸 d 、 α 片厚 b 的平均尺寸用割线法确定。

为了研究热工艺单一变量对 D 、 d 、 b 的影响, 在某一变量变化的情况下, 其他参量均保持恒定, 如表 1 所示。表中的行表示某一变量变化时 (表中用-表示), 其他参量是固定的数值。合金相变点 T_{β} 为 $990 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 热工艺参量对组织特征参数 D 、 d 、 b 影响的基本规律

变形温度对 β 晶粒尺寸 D 的影响规律如图 1a 所示。由图可以看出, 随着温度的升高, D 呈极值变化, 在 $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 D 最小, 在 $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 上, 随温度增加, D 增大。这一结果表明, 为了获得细小的晶粒, 必须选择合适的变形温度。变形温度低, 再结晶后 β 晶粒尺寸 D 未必小, 这是因为再结晶过程是热激活过程, 温度低时动态再结晶过程进行得不充分; 而温度高时, 初始 β 晶粒尺寸大, 导致最终的 β 晶粒尺寸也大, 本合金在 $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变形时 D 最小。图 1b 是变形温度对 α 集束尺寸 d 、 α 片厚度 b 的影响规律, 在 $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 d 最小而 b 最大; 在 $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 随温度的升高, d 增加而 b 减小。

收稿日期: 2008-06-11

基金项目: 国家“863”资助项目 (2002AA305107); 国防“973”资助项目

作者简介: 张旺峰, 男, 1965 年生, 博士, 北京航空材料研究院, 北京 100095, 电话: 010-62496632, E-mail: wangfeng.zhang@biam.ac.cn

表 1 热工艺参数变化

Table 1 Hot process parameters			
Deformation temperature/°C	Strain, ε	Strain rate, $\log(\dot{\varepsilon}/s^{-1})$	Cooling type
-	0.56	1	AC
1050	-	1	AC
1050	0.56	-	AC
1050	0.56	1	-

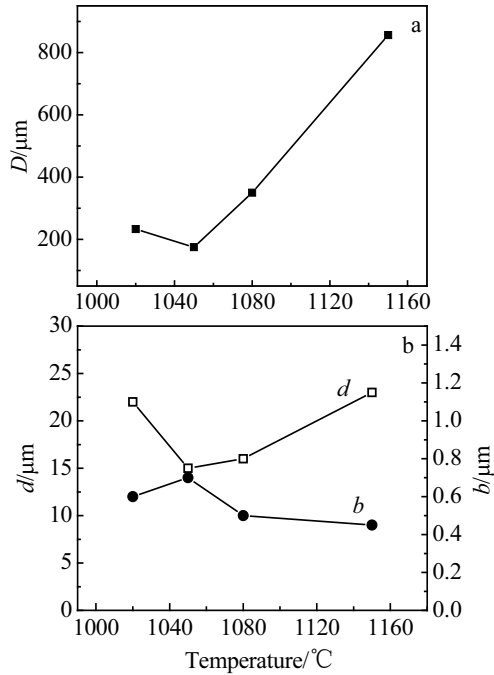


图 1 变形温度对 β 晶粒尺寸 D (a) 和 α 集束尺寸 d 、片厚 b (b) 的影响

Fig.1 Effect of deformation temperature on β grain size D (a), α -colony size d and α -lamina thickness b (b)

变形量对 β 晶粒尺寸 D 的影响如图 2a 所示。随着变形量的增加, β 晶粒尺寸 D 呈线性下降, 这种变化关系可用下式表示:

$$D_r = kD_p(1 - \varepsilon) \quad (1)$$

式中, D_r 为再结晶后的 β 晶粒尺寸; D_p 为未变形前的晶粒尺寸; k 为比例系数, 与温度有关; ε 为真实应变。通过数据拟合可以给出在 1050 °C 时, $k=1.20$; 在 1020 °C 时, $k=1.84$ 。显然, k 值越小, 细化晶粒效果越显著。这一结果表明, 细化晶粒可通过控制变形量来实现。变形量对 d 、 b 的影响规律如图 2b, 随着变形量的增加, d 、 b 均减小。

变形速率对 β 晶粒尺寸 D 的影响规律如图 3a 所示。随着变形速率的增加, β 晶粒尺寸 D 是减小的, 即增加变形速率可细化晶粒。上述结果用于实践就是在 β 区变形, 变形速率应尽可能高。变形速率对 d 、 b 的影响如图 3b。变形速率增加, d 减小、 b 增大, 即

增加变形速率不利于 α 集束尺寸的长大, 但有利于 α 片的厚度增加。

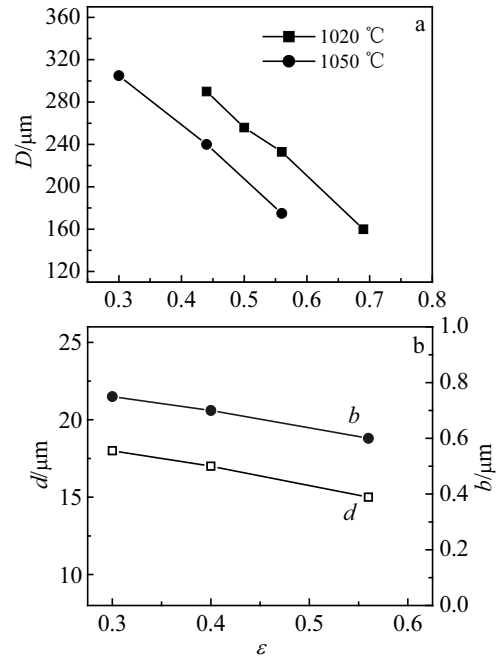


图 2 变形量对 β 晶粒尺寸 D (a) 和 α 集束尺寸 d 、片厚 b (b) 的影响

Fig.2 Effects of strain on β grain size D (a), α -colony size d and α -lamina thickness b (b)

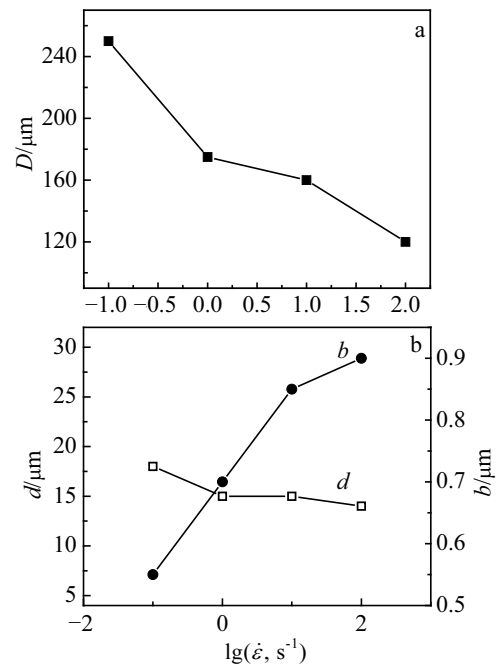


图 3 变形速率对 β 晶粒尺寸 D (a) 和 α 集束尺寸 d 、 b (b) 的影响

Fig.3 Effects of strain rate on β grain size D (a), α -colony size d and α -lamina thickness b (b)

冷却方式对 D 、 d 、 b 的影响如表 2 所示。冷却速度大, 不利于再结晶过程的发生 (即 D 增大) 及 α 集束尺寸和 α 片厚度的长大 (d 、 b 小)。

2.2 组织特征参数与拉伸性能关系

组织特征参数 D 、 d 、 b 与强度、塑性的关系如图 4~图 6。随着 β 晶粒尺寸 D 的增加, 强度塑性均下降 (图 4)。这种变化规律与钢铁材料中的 Hall-Petch 关系相一致, 即细化晶粒可提高材料的强度和塑性。强度随 d 的增加而下降 (图 5a), 塑性则随 d 的增加而得到改善 (图 5b)。在所得到的 α 片厚度 $0.45\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 范围内, 随 α 片厚度 b 的增加, 强度、塑性基本是增加的 (图 6a、6b), 即 α 片厚度的增加, 对强度、塑性都是有利的。

2.3 组织特征参数预测拉伸性能的计算公式

以上讨论是单一组织特征参数与强度塑性之间的关系。事实上, 每一种片状组织都是由 3 个特征参数决定的。因此, 每一种组织对应的强度塑性指标与 3 个特征参数之间有着相关关系, 即强度或塑性指标是 3 个组

织特征参数 (D 、 d 、 b) 的函数。通过多元回归分析, 可以得到强度、塑性与 3 个组织特征参数 (D 、 d 、 b) 之间的数学关系, 发现它们符合线性关系, 即:

$$Y=Y_0+a_1D+a_2d+a_3b \quad (2)$$

表 2 空冷和水淬后 D 、 d 、 b 的值
Table 2 The value of D , d , b for air cooling (AC) and water quenching (WQ)

Cooling type	$D/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$
AC	175	15	0.70
WQ	200	8	0.53

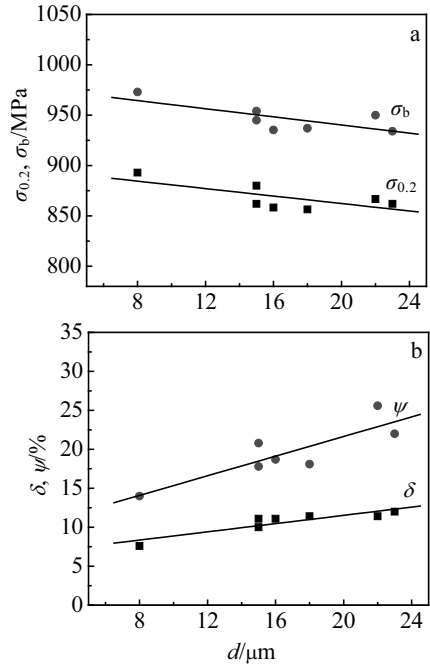


图 5 强度(a)和塑性(b)与 α 集束尺寸 d 的关系

Fig.5 Relationships between strength vs α -colony size d (a), plasticity and α -colony size d (b)

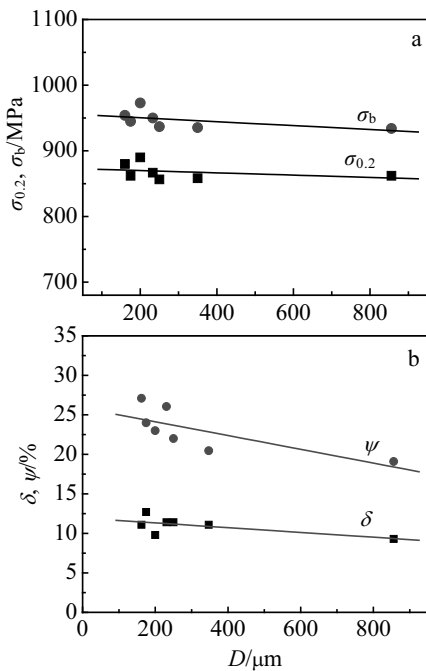


图 4 强度(a)和塑性(b)与 β 晶粒尺寸 D 的关系

Fig.4 Relationships between strength vs β grain size D (a), plasticity vs β grain size D (b)

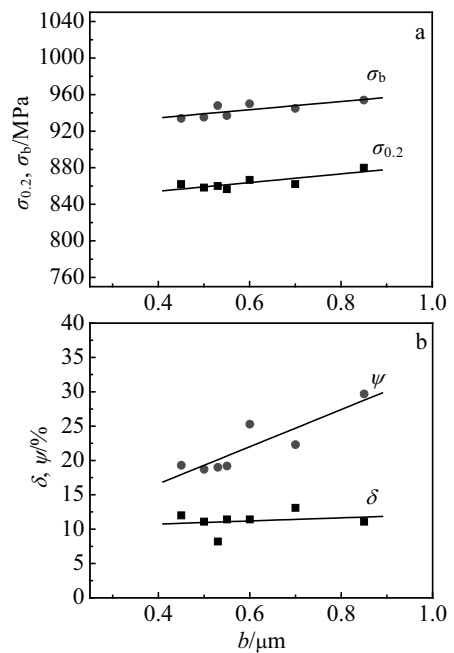


图 6 强度(a)和塑性(b)与 α 片厚度 b 的关系

Fig.6 Relationships between strength vs α -lamina thickness b (a), plasticity vs α -lamina thickness b (b)

由此可以给出强度、塑性与 D 、 d 、 b 之间的广义公式:

$$\sigma_{0.2}=881-0.019D-2.217d+30.9b \quad (3)$$

$$\sigma_b=973-0.005D-1.829d+9.7b \quad (4)$$

$$\delta=3.82-2.54 \times 10^{-4}D+0.252d+5.0b \quad (5)$$

$$\psi=-9.09-0.005D+0.808d+30.8b \quad (6)$$

按照上述公式计算得到的结果与实验测得的数值有一定误差,如表3。其误差范围:强度 $\sigma_{0.2}$ 在2~14 MPa, σ_b 在4~18 MPa;塑性 δ 在1%~2%、 ψ 在3%以内,这种误差与标准拉伸试验的精度相接近,是可以接受的。

从广义公式(2)可看出,因为 a_1 均为负数,所以增加 D 值,强度、塑性是减小的。 a_3 均为正数,说明增加 α 片厚度 b ,强度塑性均可提高。 α 集束尺寸 d 对强度的影响,是因为 $a_2 < 0$,所以增加 α 集束尺寸 d ,强度是下降的; α 集束尺寸对塑性的影响,是因为 $a_2 > 0$,所以增加 α 集束尺寸 d ,塑性是增加的。

表3 强度塑性公式计算和实验值的误差

Table 3 The error of calculated and measured strength and plasticity

Mechanical properties	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%
Error	4~18	2~14	1~2	3

3 结论

1) TA15 钛合金在 β 区变形时,在1050 °C时 D 、 d 最小, b 最大,在1050 °C以上随变形温度升高, D 、 d 增大, b 减小;变形量越大,则 D 、 d 、 b 越小;变

形速率增大, D 、 d 减小, b 增大;水淬的 D 大于空冷的 D , d 、 b 则相反。

2) D 增加,强度、塑性均下降; d 增加,塑性提高但强度下降; b 增加,强度、塑性均增加。

3) 利用多元回归分析得到了强度、塑性与3个组织特征参数 D 、 d 、 b 的定量关系式: $Y=Y_0+a_1D+a_2d+a_3b$ 。

参考文献 References

- [1] Boyer R R. *Materials Science and Engineering A*[J], 1996, A213: 103
- [2] Vassel A, Guedou J Y. *Titanium'99: Science and Technology* [C]. Prometey: CRISM, 1999: 1017
- [3] Schuts RW, Watkins H B. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, A243: 305
- [4] Brun M, Anoshkin N, Shakhanova G. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, A243: 77
- [5] Ding R, Guo Z X. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, A365: 172
- [6] Filip R, Kubiak K, Ziajia W *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 133: 84
- [7] Wang Jinyou(王金友), Ge Zhiming(葛志明), Zhou Yanbang(周彦邦). *Aeronautical Titanium Alloys(航空用钛合金)*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 208
- [8] Lütjering G. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, A243: 32
- [9] Schroeder G, Albrecht J, Lütjering G. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, A319~321: 602

The Structure Parameters and Mechanical Properties Prediction for Titanium Alloy

Zhang Wangfeng, Cao Chunxiao, Li Xingwu, Ma Jimin, Zhu Zhishou
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The effects of process parameters, such as deformation temperature, strain, strain rate and cooling condition on structure parameters (β grain size D , α -colony size d , α -lamina thickness b), and the relationship between lamella structure parameters and mechanical properties were investigated during β field hot deformation for TA15 titanium alloy. A quantitative relationship between structure parameters and mechanical properties was presented by multi-element regress analysis, and the mechanical properties could be predict by using above mentioned relationship.

Key words: titanium alloy; structure parameter; quantitative relationship; property prediction

Biography: Zhang Wangfeng, Ph. D., Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China, Tel: 0086-10-62496632, E-mail: wangfeng.zhang@biam.ac.cn