

热处理制度对 BT8 钛合金室温拉伸强度影响的回归分析*

徐 锋 杨 义 李长富 李阁平 杨 锐
(中国科学院金属研究所钛合金研究部, 沈阳 110016)

摘 要 采用正交设计确定热处理制度, 测试了不同热处理制度对 BT8 钛合金室温拉伸强度的影响, 利用多元线性回归模型对实验结果进行回归分析, 得到热处理工艺对合金室温抗拉强度的回归方程, 通过统计技术对得到的回归方程进行了方差分析, 结果显示该回归方程具有较高的可信度, 随后的热力学和动力学分析证明了该回归方程存在的科学性。

关键词 BT8 钛合金, 热处理, 正交设计, 拉伸强度

中图法分类号 TG113.12, TG146.2 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2005)10-1057-04

REGRESSION ANALYSIS OF EFFECT OF HEAT TREATMENT ON ROOM TEMPERATURE TENSILE STRENGTH OF BT8 TITANIUM ALLOY

XU Feng, YANG Yi, LI Changfu, LI Geping, YANG Rui

Titanium Alloy Laboratory, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: XU Feng, Tel: (024)23971962, E-mail: fxu@imr.ac.cn

Manuscript received 2005-06-06, in revised form 2005-07-22

ABSTRACT Room temperature tensile strengths of BT8 titanium alloy with different heat treatments according to orthogonal design were investigated. Multiple linear regression analysis was employed to establish an equation of linear regression and the equation was examined by variance analysis. The results show that the equation of linear regression is reliable. Analysis based on thermodynamics and kinetics illustrates the rationality of the equation.

KEY WORDS BT8 titanium alloy, heat treatment, orthogonal design, tensile strength

BT8 钛合金是 Ti-Al-Mo-Si 系马氏体型 $\alpha+\beta$ 两相合金^[1]。该合金室、高温综合拉伸性能良好, 特别是在 500 °C 具有优良的热稳定性、持久性能、抗疲劳性能等。等轴 α 相和 β 转变组织组成的双态组织是该合金最常见的组织, 通过调整合金成分、变形工艺和热处理制度可以使等轴 α 相的体积分数和尺寸等参数在一定范围内变化, 从而达到优化合金性能的目的^[2-5]。

本文研究了固溶热处理和时效热处理 BT8 钛合金室温拉伸强度的影响, 采用正交设计确定热处理制度, 利用多元线性回归模型对实验结果进行回归分析, 得到热处理工艺对合金室温抗拉强度的回归方程, 从而提供一种通过热处理工艺预测和控制 BT8 钛合金室温抗拉强度的方法。该方程采用回归分析技术获得, 并通过统计技术进行方差

分析, 因而具有较高的可信度。

1 实验方法

采用直径为 20 mm 的 BT8 钛合金棒材。合金的化学成分 (质量分数, %) 为: Al 6.16, Mo 3.14, Si 0.22, O 0.065, N 0.0058, H 0.0005, Ti 余量。根据文献 [1] 推荐的关于 BT8 合金的热处理温度及时间确定正交设计所需的因素水平表 (见表 1), 利用 $L_{16}(4^5)$ 正交表制定热处理制度 (见表 2), 然后在三段控温炉中进行热处理。按 GB228-2002 标准进行样品加工, 并在日本岛津 AG-5000A 电子拉伸实验机上进行室温拉伸性能测试。

2 实验结果与分析

2.1 多元线性回归分析

按照表 2 确定的实验方案, 经过热处理后得到的室温拉伸强度如表 3 所示。

采用多元线性回归模型^[6]对表 3 所示实验数据进行回归分析, 得到 BT8 合金室温拉伸强度与固溶温度、固

* 收到初稿日期: 2005-06-06, 收到修改稿日期: 2005-07-22

作者简介: 徐 锋, 男, 1975 年生, 博士生

溶时间以及时效温度的回归方程如下:

$$Y = a - 0.991X_1 - 2.43X_2 - 0.102X_3$$

其中, Y 为室温抗拉强度 (MPa); a 为一个与成分有关

表 1 因素水平表

Table 1 The factor level table used in orthogonal design

No.	Solid solution temperature ℃	Solid solution time h	Ageing temperature ℃	Ageing time h
1	920	1	570	1
2	930	2	580	1
3	940	3	590	1
4	950	4	600	1

表 2 正交实验表

Table 2 The orthogonal arrays for heat treatment, all cooling manners are air cooling

No.	Solid solution temperature ℃	Solid solution time, h	Ageing temperature ℃	Ageing time h
1	920	1	600	1
2	930	1	570	1
3	940	1	590	1
4	950	1	580	1
5	920	2	590	1
6	930	2	580	1
7	940	2	600	1
8	950	2	570	1
9	920	3	570	1
10	930	3	600	1
11	940	3	580	1
12	950	3	590	1
13	920	4	580	1
14	930	4	590	1
15	940	4	570	1
16	950	4	600	1

表 3 正交设计热处理后测量的室温拉伸强度

Table 3 Measured tensile strengths at room temperature after heat treatment according to the orthogonal design

No.	σ_b , MPa	No.	σ_b , MPa
1	1080	9	1079
2	1078	10	1062
3	1065	11	1056
4	1057	12	1051
5	1088	13	1082
6	1066	14	1066
7	1061	15	1059
8	1052	16	1047

的常数, 这里 $a=2057.83$; X_1 为固溶温度 (℃); X_2 为固溶时间 (h); X_3 为时效温度 (℃).

2.2 方差分析

利用统计量 F 来检验回归方程是否可信 [6].

$$F = \frac{n - m - 1}{m} \left(\frac{S_{reg}}{S_{res}} \right)$$

其中, S_{reg} 代表回归平方和, S_{res} 代表残差平方和. 当方程可信时 $F > F_{m, n-m-1}(\alpha)$, 这里 $F_{m, n-m-1}(\alpha)$ 为 F 表中的临界值, m 和 $n-m-1$ 为自由度, α 为显著性水平. 对该回归方程进行方差分析, 计算结果见表 4.

表 4 方差分析结果

Table 4 Results of variance analysis

Variance calculation	Sum of squares	Freedom	Mean square	F
Regression (S_{reg})	2082.062	3	694.02	40.253
Residual (S_{res})	206.898	12	17.24	
Summation	2288.96	15		

将 F 值与 F 表上的临界值相比, 若 F 值大于 $F_{m, n-m-1}(\alpha)$ 表示 Y 的变化主要是由 X 的变化造成的, 回归方程可信; 若 F 值小于 $F_{m, n-m-1}(\alpha)$, 回归方程不可信. 当 $b=0.001$ (即可信度为 99.9%) 时 F 表的临界值 $F_{m, n-m-1}(\alpha) = F_{3, 12}(0.001) = 10.80$ 小于表 4 中计算得出的 $F=40.253$, 回归方程可信.

3 讨论

通过回归方程可以看出, 如果合金的元素以及杂质含量控制在一个严格的范围之中, BT8 合金的室温拉伸强度分别与固溶温度、固溶时间以及时效温度成线性关系. 这种线性关系将现实的合金热处理控制与合金的室温拉伸性能有机地联系起来. 在以往的研究中研究人员在热处理对钛合金的显微组织和机械性能的影响方面做了大量的卓有成效的工作 [1,5], 然而这些研究主要集中在热处理制度对显微组织和显微组织对机械性能的影响方面. 以上回归方程的提出可以较为直观地应用于现实生产当中, 并带来很大方便. 方差分析结果显示其具有较高的可信度. 同时, 分析显示, 这种线性关系的存在是以相变热力学和动力学为基础的.

3.1 固溶温度对室温拉伸性能的影响

根据 Ti-Al 平衡相图 (图 1) 可知, 随着固溶温度的升高或降低, 合金的相组成发生变化. 如果合金在成分范围中两相区和单相区的边界为直线, 根据杠杆定律将会有以下关系:

$$V_\alpha + V_\beta = 1 \quad (1)$$

$$V_\alpha/V_\beta = C_1 \quad (2)$$

其中, V_α 与 V_β 分别是 α 相与 β 相的体积分数; C_1 为杠杆定律中的系数.

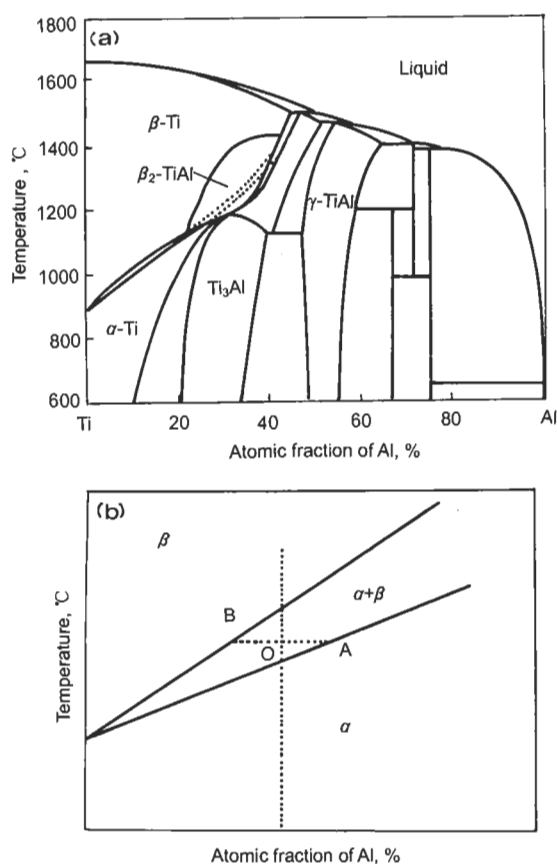


图 1 Ti-Al 二元平衡相图及杠杆定律示意图

Fig.1 Phase diagram of the Ti-Al binary system (a) and sketch map of lever law (b)

合金在相组成变化的同时, 显微组织上也将发生改变, 即初生 α 相和 β 转变组织的体积分数和尺寸发生相应的改变. 这些变化都直接影响合金的室温拉伸性能. 根据热工艺流程以及式 (2) 可知初生 α 相和 β 转变组织的体积分数之间存在以下关系:

$$V_{\alpha, p}/V_{\beta, t} = C_2 \quad (3)$$

式中, $V_{\alpha, p}$ 是初生 α 相的体积分数; $V_{\beta, t}$ 是 β 转变组织的体积分数; C_2 为常系数.

又因为 β 转变组织是由次生 α 相和 β 相组成, 所以

$$V_{\beta, t} = V_{\beta} + V_{\alpha, s} \quad (4)$$

此时, α 相由初生 α 相和次生 α 相两部分组成.

因此

$$V_{\alpha} = V_{\alpha, p} + V_{\alpha, s} \quad (5)$$

式中, $V_{\alpha, s}$ 表示次生 α 相的体积分数.

将式 (2—5) 联立可得

$$V_{\alpha, p}/V_{\alpha, s} = C_1(1 + C_1)/(C_1 + C_2) = C_3 \quad (6)$$

由此可见初生 α 相和次生 α 相的体积分数之间存在一个线性函数关系.

对于 BT8 钛合金, 由初生 α 相和 β 转变组织组成的双态组织是该合金最常见的组织, 此时该合金的强度可表示为

$$Y = K_0 + K_{\alpha, p}V_{\alpha, p} + K_{\beta, t}V_{\beta, t} \quad (7)$$

其中, $K_{\alpha, p}$ 是初生 α 相对总体强度的贡献系数; $K_{\beta, t}$ 是 β 转变组织对总体强度的贡献系数; K_0 是常系数.

又因为 β 转变组织是由次生 α 相和 β 相组成, 所以

$$K_{\beta, t}V_{\beta, t} = K_1 + K_{\alpha, s}V_{\alpha, s} + K_{\beta}V_{\beta} \quad (8)$$

其中, $K_{\alpha, s}$ 是次生 α 相对总体强度的贡献系数; K_{β} 是 β 相对总体强度的贡献系数; K_1 是平衡系数.

将式 (1) 和式 (5—8) 联立可得

$$Y = K_0 + K_1 + K_{\beta} + V_{\alpha, p}[K_{\alpha, p} + K_{\beta} + (K_{\alpha, s} - K_{\beta})/C_3] = K_2 + V_{\alpha, p}C_4 \quad (9)$$

其中, K_2 和 C_4 是合并简化后的系数.

由式 (9) 可以明显看出合金的室温拉伸强度与初生 α 相的体积分数成线性关系, 而根据相图和杠杆定律 (图 1b) 可知初生 α 相的体积分数 $V_{\alpha, p} = BO/BA$ 与温度的变化成线性关系. 这表明初生 α 相的体积分数在 $\alpha + \beta$ 两相区中与热处理温度存在线性关系. 因此可以得出, 固溶温度与合金的室温拉伸强度存在线性关系, 符合回归方程的结果.

3.2 固溶时间对室温拉伸性能的影响

随着固溶时间的增长, 合金中的初生 α 相和次生 α 相的尺寸将会增大粗化. 根据 Greenwood 的颗粒粗化方程^[7] 得到尺寸与热处理时间的关系为

$$d^3 = d_0^3 + t(3D_{\alpha}\gamma\Omega^2C_{\infty})/2RT = d_0^3 + Kt \quad (10)$$

其中, d 是热处理后 α 相的尺寸; d_0 是热处理前 α 相的尺寸, 因采用了相同的冷却方式故 d_0 是一个常数; t 是热处理时间; K 是系数.

这种由于析出物尺寸改变引起强度的变化可以通过 Hall-Patch 公式来衡量

$$Y = K_0 + K_1d^{-1/2} \quad (11)$$

将式 (10) 和式 (11) 联立可得

$$Y = K_S + K'_S t^{-1/6} \quad (12)$$

其中, K_S 和 K'_S 是合并简化后的系数.

图 2 给出了式 (12) 的函数曲线, 可以看出在适当的时间段内 ($t > t_0$) 合金的室温拉伸强度与固溶时间近似成线性关系. 又因为式 (6) 显示初生 α 相和次生 α 相体积分数之间存在一个线性函数关系, 所以在一定的固溶温度下, 随着固溶时间的增加由两者粗化而引起得室温拉伸

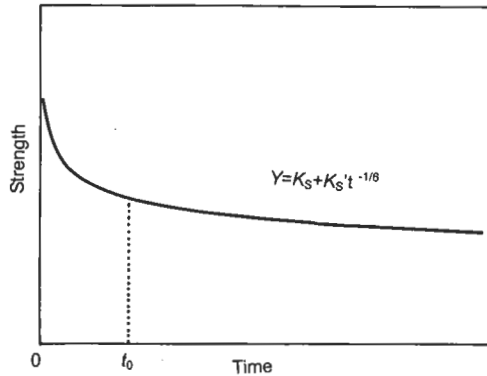


图2 $Y = K_S + K'_S t^{-1/6}$ 的函数曲线

Fig.2 Curve of function $Y = K_S + K'_S t^{-1/6}$

强度的变化也将是一个与固溶时间有关的线性关系。

3.3 时效处理对室温拉伸性能的影响

由于时效处理主要是使非平衡态的 β 相发生分解, 得到次生 α 相, 因此对时效温度和时效时间对室温拉伸强度的影响分析可以使用前面的中固溶温度和时间对室温拉伸强度影响的分析方法, 从而得到时效处理与合金的室温拉伸强度也存在线性关系, 符合回归方程的结果。

以上分析可见, 由于固溶温度与时间以及时效温度与时间分别与合金的室温拉伸强度成线性关系, 因此可以用一个线性公式

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3$$

来进行衡量, 从而验证了回归方程存在的科学性。其中, Y 为室温拉伸强度; X_1, X_2 分别为固溶温度和固溶时间, X_3 为时效温度; a_0, a_1, a_2, a_3 分别为常数。

4 结论

通过实验与分析可以得到, 如果合金的元素以及杂质含量控制在一个严格的范围内, BT8 合金的室温拉伸强度分别与固溶温度、固溶时间及时效温度成线性关系。这种线性关系的存在是以相变热力学和动力学为基础的。

参考文献

- [1] Борисова Е А, Translated by Chen S Q. *Metallography of Titanium Alloys*. Beijing: National Defence Industry Press, 1980; 262-264: 406
(Борисова Е А 著, 陈石卿译. 钛合金相学. 北京: 国防工业出版社, 1986; 262, 406)
- [2] Lü Tjering G. *Mater Sci Eng*, 1998; A243: 32
- [3] Kubiak K, Sieniawski J. *J Mater Proc Technol*, 1998; 78: 117
- [4] Filip R, Kubiak K, Ziaja W, Sieniawski J. *J Mater Proc Technol*, 2003; 133: 84
- [5] Lü Tjering G, Williams J C. *Titanium*. Germany, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003: 177
- [6] Fang K T. *Uniform Design and Uniform Design Table*. Beijing: Science Press, 1994: 19
(方开泰. 均匀设计与均匀设计表. 北京: 科学出版社, 1994: 19)
- [7] Greenwood G W. *Mechanism of Phase Transformation in Crystalline Solids*. London: Institute of Metals, 1969: 103