

Ti-1300 钛合金热处理后拉伸性能的回归分析

周 伟¹, 葛 鹏¹, 卢金文^{1,2}, 曾丽英¹, 李 倩¹, 赵永庆¹

(1. 西北有色金属研究院, 西安 710016; 2. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要: 测试不同热处理制度下 Ti-1300 钛合金的室温拉伸性能, 利用逐步回归法对 Ti-1300 钛合金热处理制度与室温拉伸性能进行回归分析, 建立了热处理制度与拉伸性能之间的回归方程。误差分析表明, 所建立的回归方程具有较高的精度, 所有数据点均落在 10% 的误差带内。该回归方程可用于指导 Ti-1300 钛合金热处理工艺的制定。

关键词: 钛合金; 拉伸性能; 逐步回归法; 回归分析

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Regression analysis of tensile properties of Ti-1300 alloy after heat treatment

ZHOU Wei¹, GE Peng¹, LU Jin-wen^{1,2}, ZENG Li-ying¹, LI Qian¹, ZHAO Yong-qing¹

(1. Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China;

(2. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The tensile properties at room temperature under different heat treatment systems were tested. Furthermore, the regression analysis was carried out to the heat treatment and tensile properties of Ti-1300 alloy based on stepwise regression method and regression equations through the analysis of variance. The error analysis shows that the constructed constitutive relationship has good accuracy and can preferably describe heat treatment system of Ti-1300 titanium alloy.

Key words: titanium alloy; tensile properties; stepwise regression method; regression analysis

钛合金是现代航空工业的关键结构材料, 对于减轻飞机质量、提高飞机机动性、减少燃料费用等都具有十分重要的意义。先进飞机的长寿命、高可靠性要求及耐久性、损伤容限设计对结构材料的比强度、韧性等性能提出了越来越高的要求, 高强韧钛合金成为结构钛合金发展的重点^[1-5]。Ti-1300 合金是西北有色金属研究院自主研发的一种新型高强韧近 β 钛合金, 该合金大规格棒材在 1 300 MPa 强度级别下具有良好的塑性和韧性匹配, 与 BT22 和 Ti-1023 相比具有更加优良的力学性能, 具有良好的应用前景。

作为一种高强近 β 钛合金, Ti-1300 合金显微组织和力学性能对热处理工艺参数的变化同样很敏感, 合金经过不同工艺热处理后, 其室温拉伸性能将不同。现有文献资料中对 Ti-1300 合金热处理工艺对性能的

影响研究还不够深入^[6-8]。为此, 本文作者研究固溶+时效热处理工艺对 Ti-1300 合金室温拉伸性能的影响, 利用逐步回归法对 Ti-1300 钛合金热处理制度与室温拉伸性能进行回归分析, 建立了热处理制度与拉伸性能之间的回归方程, 从而提供一种通过热处理制度预测和控制 Ti-1300 合金性能的方法, 为该合金热处理制度的制定并获得最佳组织和力学性能提供参考。

1 实验

实验用料为西北有色金属研究院生产的 $d310\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ Ti-1300 合金铸锭, 经锻造开坯、 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造、热轧等主要工序, 生产出 $d17\text{ mm} \times 2\text{ 000 mm}$

的棒材。采用连续升温法测试本批次合金的相变点为 $(830 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。从棒材上截取 $L=100\text{ mm}$ 试样进行热处理。热处理设备为具有2级精度的箱式电阻炉。固溶温度选在低于相变点的 $30\sim 100^\circ\text{C}$, 即定为 $770, 780, 790$ 和 800°C , 保温 1 h , 空冷。将固溶处理的棒材, 在低温时效, 选定为 $500, 520$ 和 540°C , 保温 4 h , 空冷。将热处理后的试样进行室温拉伸性能测试, 拉伸试验在 INSTRON 5982 电子万能试验机上进行。

2 结果与讨论

2.1 热处理对室温拉伸性能的影响

图1所示为 Ti-1300 钛合金室温拉伸性能与热处理制度的关系曲线。由图1可见, 时效前随着固溶温度的提高, 合金的强度降低, 塑性略有增加。固溶温度越高, 初生 α_p 相的含量越少, α 与 β 两相相界面减少, 即位错运动的障碍减少, 使第二相强化效果减弱,

因此导致合金的强度降低^[9]。时效处理明显提高了合金的强度, 例如: 780°C 固溶+ 500°C 时效时, 合金的抗拉强度由约 970 MPa 提高至 $1\ 550\text{ MPa}$, 强度提高约 580 MPa 。强度的提高必然会牺牲塑性, 与时效前相比, 在试验温度范围内, 合金时效后伸长率均有约 50% 的降幅。相同时效条件下, 固溶温度越高, 时效后合金的塑性降幅越大。时效处理后, 亚稳定 β 相分解成弥散的次生 α_s 相。时效温度越高, 析出的次生 α_s 相尺寸越大。根据 Orowan 强化机制^[10], 在有效强化尺寸范围内, 析出相的尺寸越小强化效果就应该越明显, 也就是说, 时效温度越低, 合金的强度应该越高。

2.2 热处理后拉伸性能的回归分析

回归分析是研究相关关系的一种数学建模方法, 利用逐步回归法^[11]对 Ti-1300 钛合金固溶时效态的室温拉伸性能进行回归分析, 即室温拉伸性能直接通过固溶温度与时效温度进行表达。

图2所示为 Ti-1300 钛合金室温拉伸性能随时效温度变化的关系图。由图2可以看出, 固溶温度为定

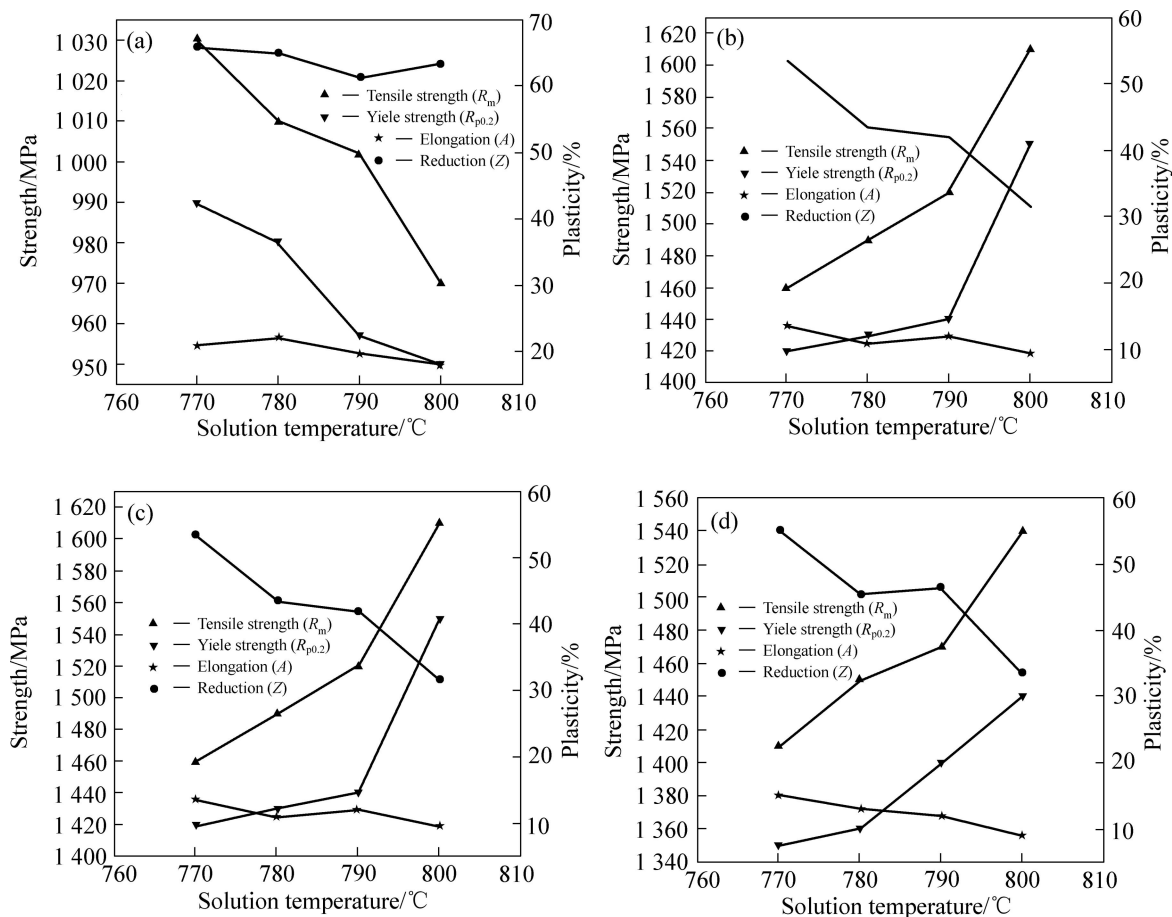


图1 不同热处理下的拉伸性能曲线

Fig. 1 Curves of tensile properties at different heat treatments: (a) Before aging; (b) Aging at 500°C ; (c) Aging at 520°C ; (d) Aging at 540°C

值时，合金的室温拉伸性能与时效温度基本呈线性关系。以时效温度 t_a 为自变量对热处理后合金的室温拉伸性能均可以写成 $Y=a+bt_a$ 的形式(t_a 为时效温度)，且参数 a 和 b 均与固溶温度具有很强的关系。表 1 列出了不同固溶温度下室温拉伸性能的 a 和 b 值。

对不同固溶温度下的 a 和 b 值与固溶温度进行回归分析，即得到不同室温性能下参数 a 和 b 值与固溶温度关系的回归数据，并将数据代入 $Y=a+bt_a$ ，得到固溶时效态合金的室温拉伸性能回归方程：

$R_m=-3\,510.4+7.96t_s+7t_a-0.012t_st_a$

$R_{p0.2}=-4\,638.7+8.84t_s+9.27t_a-0.014t_st_a$
 $A=243.9-0.32t_s-0.29t_a+0.000\,414t_st_a$
 $Z=852.3-1.08t_s-0.89t_a+0.001\,23t_st_a$

式中： t_s 为固溶温度，℃； t_a 为时效温度，℃。

作为一个热处理与力学性能的定量性能分析模型，对公式的验证可以保证模型使用的正确性和合理性。图 3 所示为所构建回归方程的误差精度效果图。图 3 中边部两条直线为满足相对误差小于和等于 10% 的误差带，中间一条直线上的点是实验值与计算值相等的点。由图 3 可以看出，所有数据点均落在 10% 的误

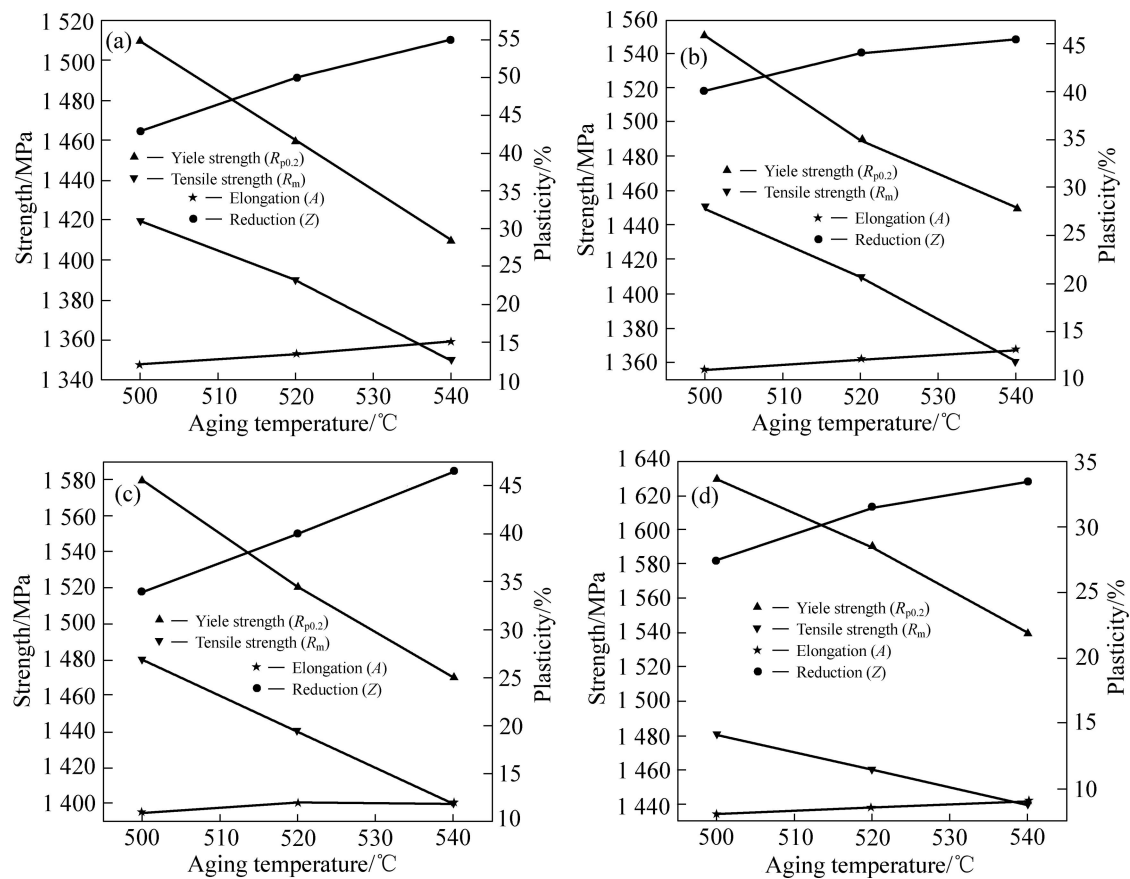


图 2 合金室温拉伸性能与时效温度的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between room temperature tensile properties of alloy and aging temperature: (a) Solution at 770 °C; (b) Solution at 780 °C; (c) Solution at 790 °C; (d) Solution at 800 °C

表 1 不同固溶温度下拉伸性能的 a 和 b 值

Table 1 Values of a and b for tensile properties at different solution temperatures

Solution temperature/℃	R_m		$R_{p0.2}$		A		Z	
	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
770	2 760	-2.5	2 296.7	-1.75	-25.5	0.075	-106.7	0.3
780	2 796.7	-2.5	2 576.7	-2.25	-14	0.05	-28.6	0.137 5
790	2 953.3	-2.75	2 480	-2	-1.5	0.025	-122.3	0.312 5
800	2 756.7	-2.25	1 980	-1	-4.5	0.025	-47.17	0.15

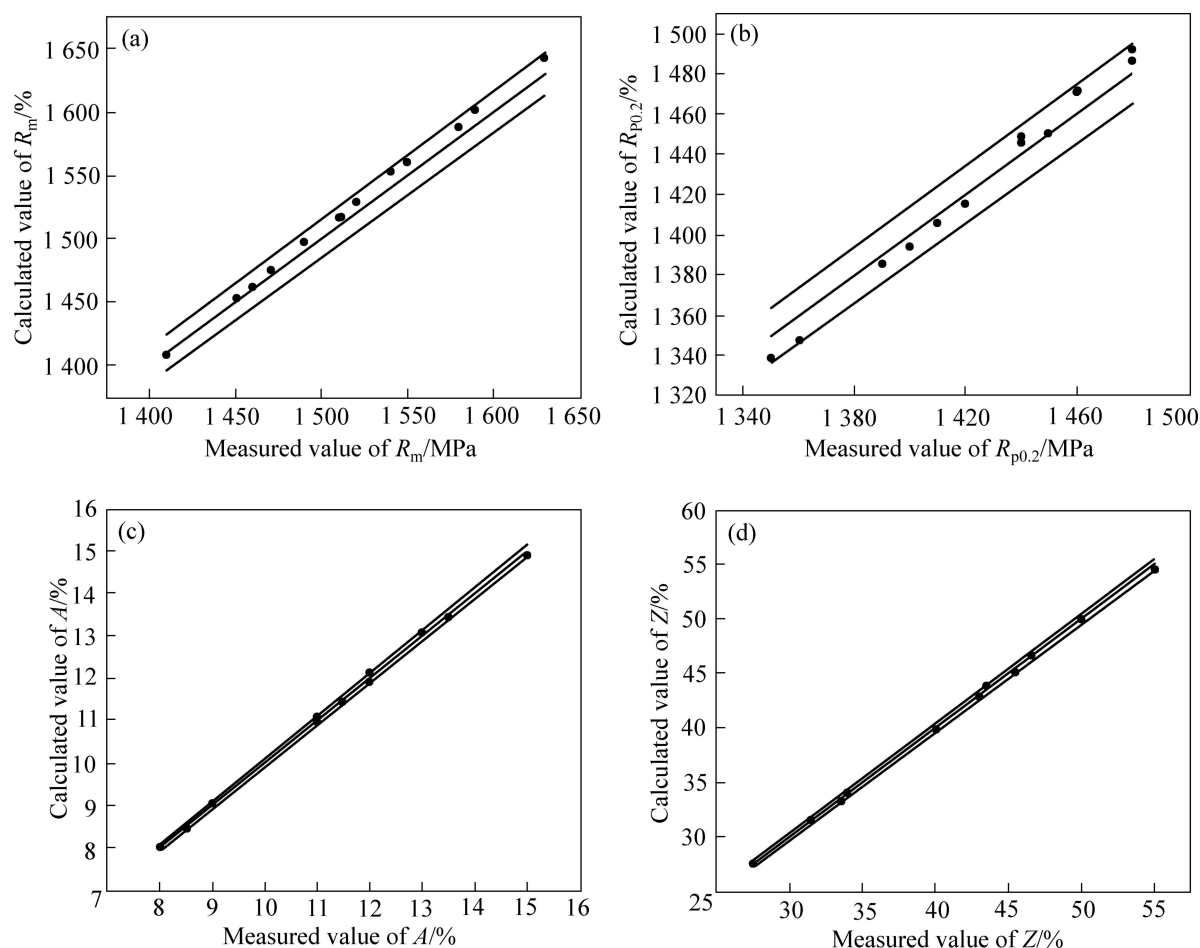


图 3 试验数据和计算数据散点图

Fig. 3 Scatter diagram of calculated and measured data: (a) R_m ; (b) $R_{p0.2}$; (c) A ; (d) Z

差带内。以上分析说明所构建回归方程的精度较高。

的精度, 所有数据点中落在 10% 的误差带内。该回归方程可用于指导 Ti-1300 钛合金热处理工艺的制定。

3 结论

1) Ti-1300 合金时效处理前随着固溶温度的提高, 合金的强度降低, 塑性略有增加。时效处理明显提高了合金的强度, 但与时效前相比, 合金时效后伸长率均有约 50% 的降幅。相同时效条件下, 固溶温度越高, 时效后合金的塑性降幅越大。

2) 在试验条件下, 合金的拉伸性能与热处理参数的关系方程如下:

$$R_m = -3\,510.4 + 7.96t_s + 7t_a - 0.012t_s t_a$$

$$R_{p0.2} = -4\,638.7 + 8.84t_s + 9.27t_a - 0.014t_s t_a$$

$$A = 243.9 - 0.32t_s - 0.29t_a + 0.000\,414t_s t_a$$

$$Z = 852.3 - 1.08t_s - 0.89t_a + 0.001\,23t_s t_a$$

3) 误差分析表明, 所建立的回归方程具有较高

REFERENCES

- [1] LI Chen-lin, MI Xu-jun, YE Wen-Jun, HUI Song-xiao, LEE Dong-geun, LEE Yong-tai. Influence of heat treatment on microstructure and tensile property of a new high strength beta alloy Ti-2Al-9.2Mo-2Fe[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 580: 250-256.
 - [2] WANG Zhe-jin, QIANG Hong-fu, WANG Xun-ren, WANG Guang. Constitutive model for a new kind of metastable β titanium alloy during hot deformation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(3): 634-641.
 - [3] 程亮, 常辉, 樊江昆, 唐斌, 寇宏超, 李金山. 新型近 β 钛合金 Ti-7333 高温变形行为研究[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(1): 22-25.
- CHENG Liang, CHANG Hui, FAN Jiang-kun, TANG Bin, KOU Hong-chao, LI Jin-shan. High-temperature deformation behavior of new near- β titanium alloy[J]. Iron Steel Vanadium

- Titanium, 2013, 34(1): 22–25.
- [4] LI Cheng-lin, MI Xu-jun, YE Wen-jun, HUI Song-xiao, YU Yang, WANG Wei-qi. A study on the microstructures and tensile properties of new beta high strength titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 550: 23–30.
- [5] FAN J K, KOU H C, LAI M J, TANG B, CHANG H, LI J S. Characterization of hot deformation behavior of a new near beta titanium alloy: Ti-7333[J]. Materials and Design, 2013, 49: 945–952.
- [6] 赵映辉, 葛 鹏, 赵永庆, 杨冠军, 汶建宏. Ti-1300 合金的热变形行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 46–49.
- ZHAO Ying-hui, GE Peng, ZHAO Yong-qing, YANG Guan-jun, WENG Jian-hong. Hot deformation behavior of Ti-1300 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(1): 46–49.
- [7] 汶建宏, 葛 鹏, 杨冠军, 毛小南, 周 伟. 热处理工艺对 Ti-1300 合金的组织 and 拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(8): 1490–1494.
- WEN Jian-hong, GE Peng, YANG Guan-jun, MAO Xiao-nan, ZHOU Wei. Effect of heat treatment process on microstructure and tensile properties of Ti-1300 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(8): 1490–1494.
- [8] 赵映辉, 葛 鹏, 杨冠军, 赵永庆, 毛小南. Ti-1300 合金锻造加工的热压缩模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 550–553.
- ZHAO Ying-hui, GE Peng, YANG Guan-jun, ZHAO Yong-qing, Mao Xiao-na. Forging simulation of Ti-1300 alloy by hot compressing testing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3): 550–553.
- [9] 贾百芳, 杨 义, 周 伟, 葛 鹏, 冯 亮, 杨冠军. TC18 钛合金室温拉伸性能与热处理制度的关系[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 587–592.
- JIA Bai-fang, YANG Yi, ZHOU Wei, GE Peng, FENG Liang, YANG Guan-jun. Relationship between heat treatment process and room-temperature tensile properties of TC18 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 587–592.
- [10] 徐祖耀, 李鹏兴. 材料科学索引[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 598.
- XU Zu-yao, LI Peng-xing. Introduction of materials science [M]. Shanghai: Science and Technology Press of Shanghai, 1986: 598.
- [11] 孙志超, 杨 合, 沈昌武. 基于逐步回归法的 TA15 钛合金本构模型的建立[J]. 锻压技术, 2008, 33(2): 10–15.
- SUN Zhi-chao, YANG He, SHEN Chang-wu. Establishment of TA15 titanium alloy constitutive model based on stepwise regression method[J]. Forging and Stamping Technology, 2008, 33(2): 10–15.
- [12] 晋芳伟, 陈绍甫, 石自友. ZG35 钢力学性能的回归分析[J]. 云南农业大学学报, 2000, 15(1): 72–75.
- JIN Fang-wei, CHEN Shao-fu, SHI Zi-you. Regression analysis on the mechanical properties of ZG35 steel[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2000, 15(1): 72–75.

(编辑 何学锋)