

# 退火工艺对 TA18 钛合金管材力学性能与微观组织影响

魏栋 苏锦旋 李萌\* 吴卫国 弓满锋

岭南师范学院 机电工程学院

DOI:10.32629/etd.v6i5.16879

**[摘要]** 本文以航空液压系统用TA18钛管为研究对象,对冷轧态管材进行不同温度退火工艺试验,采用万能电子试验机和扫描电镜分别对冷轧态和不同温度退火后管材进行单向拉伸试验以及微观组织表征分析,揭示了退火工艺对高强TA18钛管力学性能和微观组织的影响规律。结果表明:随着退火温度的升高,管材屈服强度和抗拉强度逐渐下降,而伸长率逐渐提高。400℃退火处于去应力退火阶段,管材微观组织与冷轧态相比变化并不明显。退火温度升高到600℃时,管材开始发生再结晶并呈现出等轴状晶粒组织,当退火温度达到800℃时,管材晶粒出现明显的长大。

**[关键词]** 高强TA18钛管; 退火温度; 力学性能; 微观组织

**中图分类号:** P412.11 **文献标识码:** A

## Effects of Annealing Process on Mechanical Properties and Microstructure of TA18 titanium alloy tubes

Dong Wei Jinxuan Su Meng Li\* Weiguo Wu Manfeng Gong

School of Mechanical and Electrical Engineering, Lingnan Normal University

**[Abstract]** The TA18 titanium alloy tubes which applied in aviation hydraulic systems were taken as the case in this paper. The annealing experiments under different temperatures were carried out on the cold-rolled tubes. The uniaxial tensile tests and microstructure characterization of the above tubes were performed using electronic universal testing machine and scanning electron microscopy, respectively. The effects of annealing process on mechanical properties and microstructure of the tube were investigated. The results showed that as the annealing temperature increased, the yield stress and ultimate stress of the tube were gradually decreased, while the elongation was gradually increased. The microstructure of the tube annealed under the temperature of 400 °C had no significant difference compared to cold-rolled tube. When the annealing temperature raised to 600 °C, the recrystallization was occurred and grains exhibited equiaxed structure. With the annealing temperature further increased to 800 °C, significantly grain growth was appeared.

**[Key words]** High-strength TA18 titanium alloy tube; annealing temperature; mechanical properties; microstructure

### 引言

TA18钛合金管材属于近 $\alpha$ 型钛合金材料,具有优异的综合力学性能、焊接性能和成形性能<sup>[1,2]</sup>,被广泛应用于先进飞行器和发动机液压与气动等关键管路系统构件<sup>[3,4]</sup>。其中无缝钛合金管材通常采用皮尔格冷轧工艺制备获得<sup>[5]</sup>,然而,高强TA18钛合金管材滑移系少、变形抗力大,因此实际生产过程往往要进行多道次冷轧并结合中间和最终退火处理来获得最终成品管材<sup>[6,7]</sup>。其中中间退火采用再结晶退火处理实现管材强度与塑性的良好匹配以便于下一道次轧制,而最终退火采用去应力退火方式以消除管材内应力并有效保留管材的强度。

目前众多学者针对钛合金管材退火工艺展开了研究,蔡国帅等<sup>[8]</sup>研究了冷轧变形和退火温度对TC4钛合金管材组织与性能的影响,发现当变形量增大时,管材极易出现表面缺陷和裂纹,随着退火温度的升高,等轴组织占比逐渐变大。周大地等<sup>[9]</sup>研究了由皮尔格冷轧制备获得的TA18合金管材在去应力退火过程中显微组织与微织构随保温时间的变化规律,结果表明500℃退火时管材保留了大量变形特征,且保温时间的延长对再结晶体积分数的影响并不显著,此外退火过程中(0001)晶面极图中的织构类型并没有发生明显变化。赵圣泽等<sup>[10]</sup>针对冷轧加滚珠旋压工艺制备的Ti-Ta系近 $\alpha$ 型钛合金薄壁管,分析

了再结晶退火时退火温度和保温时间对管材微观组织与力学性能的影响, 得出了适用于波纹管成形性能要求的退火温度和保温时间范围。

本文以冷轧态TA18钛合金管材为研究对象, 进行不同温度条件的退火工艺试验, 分别对冷轧态和退火后管材试样进行单向拉伸试验, 揭示退火温度对管材力学性能的影响规律, 进一步通过微观组织表征分析, 阐明退火温度对管材微观组织的影响规律及其对力学性能的作用机理。

1 试验材料与方法

本文研究选用通过皮尔格冷轧生产的高强TA18钛合金管材为研究对象, 规格为 $\phi 6.1\text{mm} \times 0.675\text{mm}$ 。采用高真空高温钎焊炉对冷轧态管材进行真空退火热处理试验, 退火温度分别选取400℃、600℃和800℃, 升温速率为10℃/min, 保温时间均为2小时, 冷却方式均采用随炉冷却。

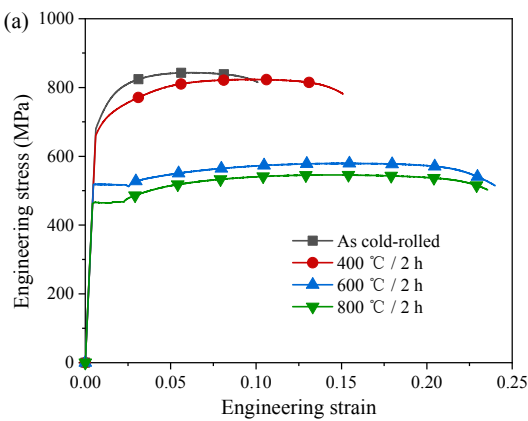
分别对冷轧态和不同温度退火后钛管进行单向拉伸力学性能测试, 管材拉伸试验在MTS电子万能试验机上进行。管材拉伸试样总长为154mm, 标距段长度为50mm。单向拉伸过程采用的拉伸速率为3mm/min。管材微观组织测试样品采用长度为5mm半管试样, 测试平面为管材纵截面, 对试样依次进行机械研磨和电解抛光, 电解抛光所使用的电解液为10%高氯酸+90%冰醋酸所配置的溶液, 微观组织表征采用TESCAN MIRA 3型场发射扫描电镜进行。

2 结果分析与讨论

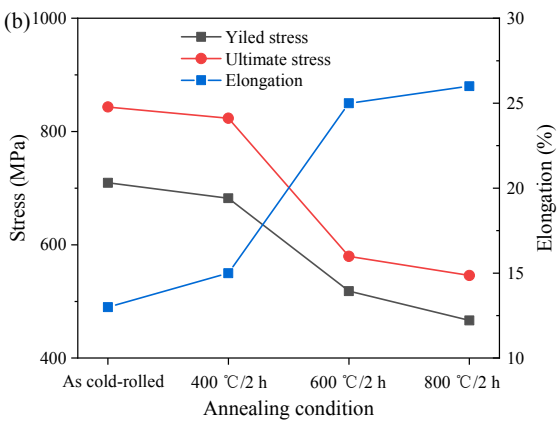
2.1 退火温度对管材力学性能的影响

冷轧态及不同温度退火后管材工程应力应变曲线和强度与延伸率对比分别如图1(a)和1(b)所示。从图中可以看出, 随着退火温度的升高, 管材屈服强度和抗拉强度逐渐下降, 而伸长率逐渐提升。与冷轧态管材相比, 400℃退火后管材屈服强度和抗拉强度出现了小幅下降, 伸长率从13%提高到了15%, 强度与延伸率变化并不显著, 这也可以说明400℃退火处于去应力退火阶段。当退火温度升高到600℃和800℃时, 管材强度出现了显著下降而伸长率明显提升, 此外相较冷轧态和400℃退火后管材, 600℃和800℃退火后试样应力应变曲线出现了明显的屈服平台, 可以推断在该温度条件下退火时管材发生了再结晶变化。800℃时管材屈服强度和抗拉强度分别下降到约466 MPa和546 MPa, 但800℃退火后管材与600℃退火后管材相比伸长率变化并不明显, 均为25%左右。

通过胡克定律和SWIFT函数对管材弹性模量、强度系数和硬化指数进行拟合, 塑性段拟合曲线与实验曲线的相关系数分别为0.99575、0.99949、0.99977、0.99977, 具有良好的拟合效果。对应的强度系数K和硬化指数n大小如表1所示, 可以看出TA18钛管强度系数随着退火温度的升高呈先增大后减小的趋势, 而硬化指数随退火温度的升高呈逐渐增大的趋势。



(a) 工程应力应变曲线



(b) 强度与延伸率对比

图1 不同温度退火后管材力学性能对比

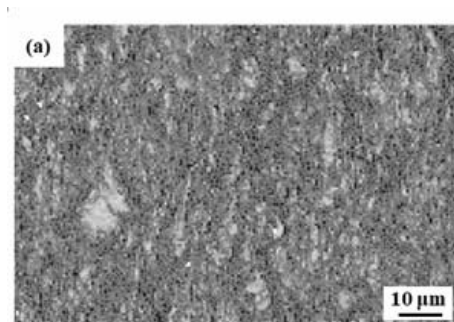
表1 不同温度退火后管材强度系数与硬化指数对比

| 力学性能参数    | 冷轧态     | 400 °C / 2 h | 600 °C / 2 h | 800 °C / 2 h |
|-----------|---------|--------------|--------------|--------------|
| 强度系数K/MPa | 1111.29 | 1168.05      | 896.26       | 815.01       |
| 硬化指数n     | 0.07    | 0.11         | 0.14         | 0.15         |

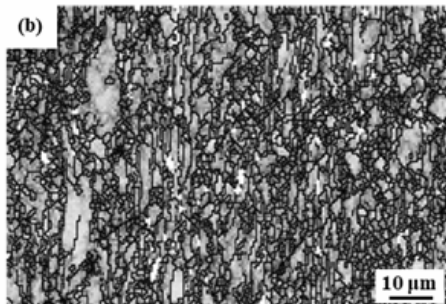
2.2 退火温度对管材微观组织的影响

图2所示为冷轧态和不同温度退火后TA18管材微观组织形貌, 从图中可以看出冷轧态管材晶界难以辨别, 呈纤维状变形组织。进行400℃退火后, 管材组织同样呈现出沿轧制方向拉长的纤维状晶粒, 同时可以看出有明显的破碎和细化的晶粒。当退火温度升高到600℃时, 管材晶粒开始发生再结晶, 呈现出等轴状晶粒, 随着退火温度进一步增大到800℃, 晶粒开始发生合并长大, 单位体积内晶界减少。对不同温度退火后管材晶粒大小进行统计分析, 结果如图3所示, 可以看出管材晶粒尺寸随退火温度的增大而逐渐增大, 800℃退火后晶粒长大到约4.77 μm。退火过

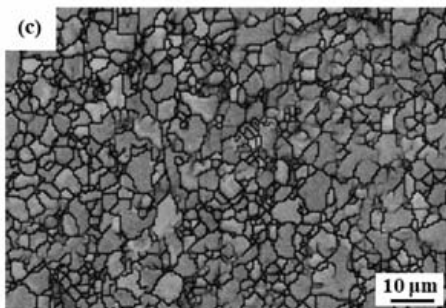
程中管材晶粒尺寸的增大与晶界的减少进而使得阻碍位错开动的能力减弱,而位错和孪晶等缺陷导致的系统储存能进一步释放,这也是引起管材强度下降与伸长率增大的最主要原因,同时满足Hall-Petch关系。



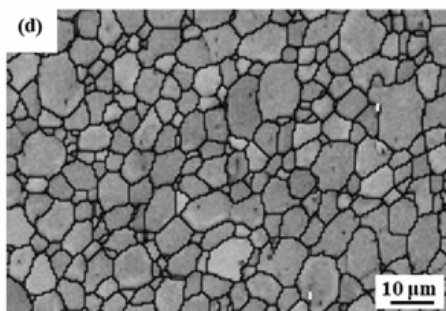
(a) 冷轧态



(b) 400 °C



(c) 600 °C



(d) 800 °C

图2 不同温度退火后管材微观组织

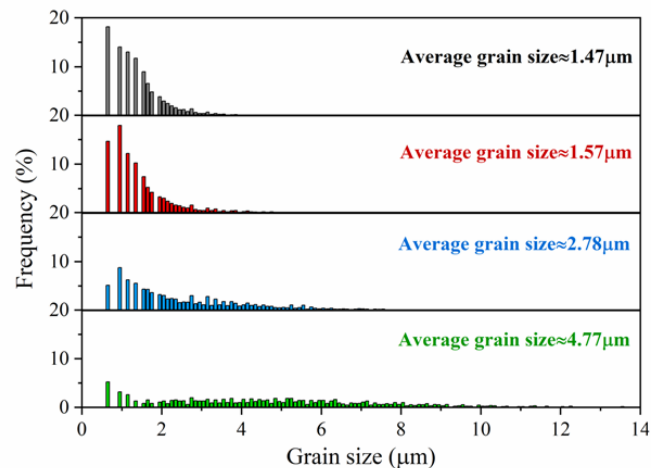


图3 不同温度退火后管材晶粒尺寸分布

### 3 结论

(1) 随着退火温度的升高,钛管屈服强度和抗拉强度逐渐下降,而伸长率逐渐提升;400 °C退火后管材强度下降并不显著,600 °C和800 °C退火后管材强度大幅降低同时伸长率显著增大,但800 °C退火后管材与600 °C退火后管材相比伸长率变化并不明显。

(2) 冷轧态TA18管材组织呈纤维状变形组织,晶粒充分破碎,400 °C退火处于去应力退火阶段,管材组织变化并不明显;当退火温度升高到600 °C时,管材晶粒开始发生再结晶呈现出等轴状晶粒,当退火温度达到800 °C时,晶粒开始发生长大,此外管材晶粒尺寸随退火温度的增大而逐渐增大。

### 【参考文献】

- [1] D. Banerjee, J. C. Williams. Perspectives on Titanium Science and Technology[J]. Acta Materialia, 2011, 61(3): 844-879.
- [2] Q. Zhao, Q. Sun, S. Xin, Y. Chen, C. Wu, H. Wang, J. Xu, M. Wan, W. Zeng, Y. Zhao. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process[J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 845: 143260.
- [3] H. Yang, H. Li, Z. Zhang, M. Zhan, J. Liu, G. Li. Advances and trends on tube bending forming technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25: 1-12.
- [4] 张旺峰, 张晖, 颜孟奇, 等. 飞机液压系统用TA18钛合金管材性能特殊性研究[J]. 钛工业进展, 2018, (35): 22-25.
- [5] 李恒, 魏栋, 杨恒, 等. 高性能管材二辊皮尔格冷轧成形研究动态及存在问题[J]. 航空制造技术, 2018, 61(21): 92-101.
- [6] D. Wei, Y. Y. Chen, H. Li, J. C. Yang. Residual stress evolution and tailoring of cold pilgered Ti-3Al-2.5V tube. International Journal of Mechanical Science, 2022, 225: 107366.
- [7] 杨亚社, 杨永福, 罗登超. 航空用TA18管材加工工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 625-628.

[8]蔡国帅,朱宝辉,陈胜川,等.冷轧和退火对TC4钛合金管组织和性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(21):86-88.

[9]周大地,曾卫东,徐建伟,等.冷轧钛管在退火过程中的显微组织与织构演变[J].稀有金属,2019,43(5):470-475.

[10]赵圣泽,郭荻子,王晓,等.Ti-Ta系近 $\alpha$ 型钛合金极薄壁

管材退火工艺研究[J].钛工业进展,2022,39(06):28-31.

### 作者简介:

魏栋(1990--),男,汉族,山西孝义人,博士研究生,职称:讲师,研究方向:管材轧制成形形性调控及精确塑性成形多尺度仿真建模。