

# 显微组织类型对 TC4 钛合金丝材性能的影响

王清瑞, 沙爱学, 黄利军, 黄旭

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:**  $\alpha + \beta$  两相区轧制的 TC4 钛合金丝材经不同工艺热处理后, 获得等轴组织、双态组织和片层组织, 研究了微观组织特征及其对合金拉伸性能和疲劳性能的影响。结果表明: 等轴组织  $\alpha$  晶粒最为细小且具有较高的位错密度, 表现出最高强度; 双态组织  $\alpha$  相较等轴组织显著长大, 位错密度明显降低, 具有最好的工艺塑性; 片层组织原始  $\beta$  晶粒粗大, 塑性最低。3 种组织中片层组织疲劳性能最好, 当裂纹长度  $< 250 \mu\text{m}$  时, 不同显微组织对应的裂纹扩展速率差异较大, 片层组织的扩展速率最低, 等轴组织最高; 当裂纹长度  $> 250 \mu\text{m}$  时, 3 种组织的裂纹扩展速率无显著差异。综合考虑 TC4 钛合金丝材的力学性能和工艺塑性, 应选择双态组织作为产品的最终组织状态。

**关键词:** TC4 钛合金丝材; 微观组织; 拉伸性能; 疲劳性能

中图分类号: TG146. 23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)04-012-04

## Influence of Different Type of Microstructure on Properties of TC4 Titanium Alloy Wire

Wang Qingrui, Sha Aixue, Huang Lijun, Huang Xu

(Beijing Institute of Aeronautical Materials AECC, Beijing 100095, China)

**Abstract:** By different heat treatments and microstructural analysis methods, microstructure characteristics of equiaxed structure, duplex structure and lamellar structure for TC4 titanium alloy were observed in this study. Meanwhile, the influence of different microstructure on tensile property and fatigue property was studied. The results show that equiaxed structure with the finest  $\alpha$  grain and high dislocation density exhibits the highest strength; duplex structure, with bigger  $\alpha$  phase and lower dislocation density than that of equiaxed structure, presents excellent process plasticity; lamellar structure, with coarse original  $\beta$  grain, presents the lowest plasticity. While, the lamellar structure presents the best fatigue property. When crack size is lower than  $250 \mu\text{m}$ , the crack growth rates of three microstructures are obviously difference. The lamellar structure exhibits the lowest crack growth rate, and it is the highest for equiaxed structure. When crack size is higher than  $250 \mu\text{m}$ , there is no obvious difference. Considering the mechanical properties and process plasticity of TC4 titanium alloy wire, duplex structure should be selected as the final structure state of the products.

**Key words:** TC4 titanium alloy wire; microstructure; tensile property; fatigue property

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好和耐高温等优良性能, 广泛应用于航空航天、石油化工、舰船等领域<sup>[1-3]</sup>。随着航空工业的发展, 钛合金紧固件的用量越来越大。在同样的强度指标下, 相比钢制紧固件, 钛合金紧固件减重 30% ~ 40%<sup>[4,5]</sup>。波音 747 飞机上以钛制紧固件代替钢制紧固件后, 其结

构重量减轻 1814 kg; 美国 C-5A 飞机采用钛合金螺栓后, 减重约 1000 kg; 俄罗斯伊尔 96 飞机上所使用的钛标准件达 14.2 万件, 减重约 600 kg。同时, TC4 钛合金与 Ti-45Nb 合金搭配, 制成的双金属铆钉已经在空客和波音飞机上获得大量应用<sup>[6-8]</sup>。钛合金紧固件还具有优异的耐腐蚀性能, 其正电位性能与碳纤维复合材料相匹配, 能够有效防止紧固件的电偶腐蚀。目前, 钛合金紧固件已经成为先进民用飞机和军用飞机必不可少的关键材料<sup>[9-14]</sup>。

收稿日期: 2022-06-01

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-VIII-0003-0165)

通信作者: 王清瑞(1981—), 女, 高级工程师。

TC4 钛合金是国内外应用最为广泛的钛合金,也是航空紧固件使用最为普遍的钛合金。前期研究表明,显微组织参数对 TC4 钛合金的拉伸性能以及疲劳性能有着显著影响<sup>[15-17]</sup>。但关于不同类型显微组织对 TC4 钛合金拉伸、疲劳等综合性能影响的研究尚不透彻,而这些恰好是紧固件制造最为关心的问题。为此,研究了 TC4 钛合金丝材不同显微组织类型对其力学性能的影响,以期为企业合理选择 TC4 钛合金紧固件的热处理制度提供一定的参考。

## 1 实验

实验材料为经过  $\alpha + \beta$  两相区轧制变形的规格为  $\phi 20$  mm 的 TC4 钛合金丝材,其相变点为  $992$  °C。按照表 1 中 3 种不同工艺对 TC4 钛合金丝材进行热处理,分别获得等轴、双态、片层 3 种典型组织。采用

扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)观察微观组织。采用 Instron-4507 万能试验机进行拉伸性能测试。采用 SEM-SERVO 原位疲劳试验机进行疲劳试验,应力比  $R = 0.1$ 。

表 1 TC4 钛合金丝材的热处理工艺

Heat treatment process	Microstructure
820 °C/2 h/AC	Equiaxed structure
950 °C/1.5 h/AC + 540 °C/6 h/AC	Duplex structure
1020 °C/45 min/AC	Lamellar structure

## 2 结果与分析

### 2.1 微观组织特征

TC4 钛合金丝材经相变点以下( $820$  °C)热处理获得等轴组织,其 TEM 照片如图 1 所示。

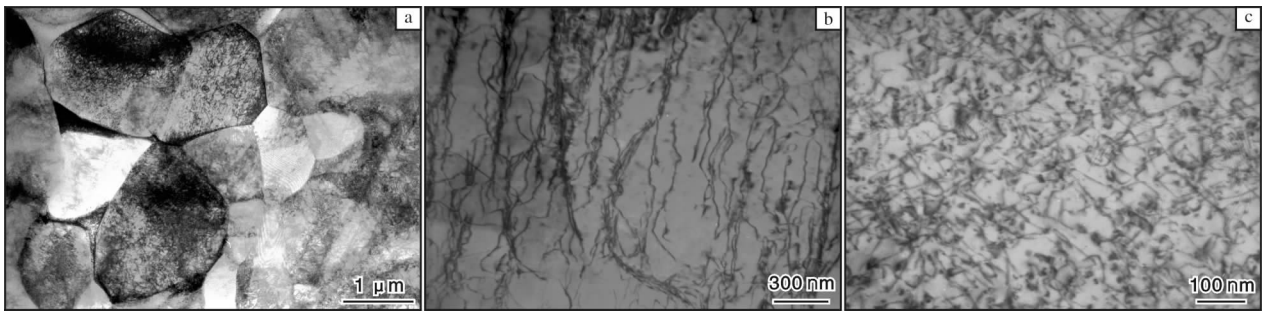


图 1 TC4 钛合金丝材等轴组织的 TEM 照片

Fig. 1 TEM images of TC4 titanium alloy wire with equiaxed structure: (a) equiaxed grain; (b) dislocation in equiaxed grain; (c) sub grain boundary in  $\alpha$  phase

TC4 钛合金经过大变形量轧制后,内部组织结构得到充分的变形和破碎,获得的等轴晶粒均匀细小, $\alpha$  晶粒尺寸约为  $1$   $\mu\text{m}$ (图 1a)。进一步观察,大部分等轴晶粒内位错聚集,位错密度较高,或排列整齐或交织成网状(图 1b),这些都反映了  $\alpha$  相形变的特征。等轴组织内部存在大量亚晶界, $\alpha$  相本身没有发生再结晶(图 1c)。TC4 钛合金形变加工和热处理过程中,晶粒不断细化,晶界面积不断增加,以致阻碍位错运动的障碍越来越多,位错密度增大,从而起到增加材料强度的效果。

图 2 为 TC4 钛合金丝材经固溶时效处理后双态组织的 SEM 照片,其球状初生  $\alpha$  相尺寸约为  $10$   $\mu\text{m}$ 。图 3 为 TC4 钛合金丝材双态组织的 TEM 照片。在双态组织中,相邻的球状  $\alpha$  相之间依然存在一定数量的亚晶界(图 3a)。球状  $\alpha$  相内位错密度不高,少量

位错排列成位错墙(图 3b)。排列整齐的位错墙及低的位错密度表明, $\alpha$  相发生了静态回复和再结晶。片状  $\alpha$  相内及  $\alpha/\beta$  相界面上仍有一定数量的位错(图 3c),但是与等轴组织相比,位错密度显著下降。

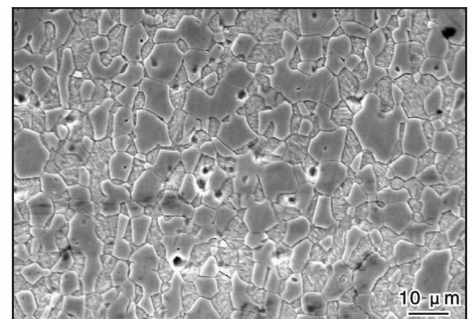


图 2 TC4 钛合金丝材双态组织的 SEM 照片

Fig. 2 SEM microstructure of TC4 titanium alloy wire with duplex structure

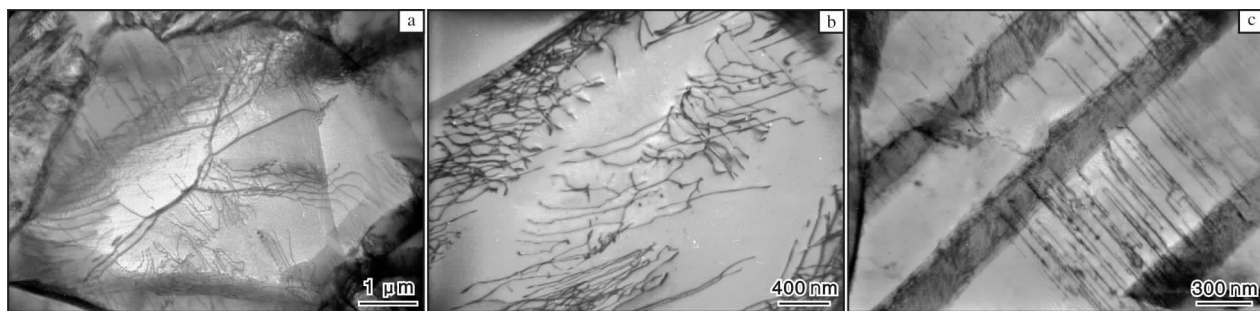


图3 TC4钛合金丝材双态组织的TEM照片

Fig. 3 TEM images of TC4 titanium alloy wire with duplex structure: (a) sub grain boundary in  $\alpha$  phase; (b) dislocation wall; (c) low density dislocation

TC4钛合金丝材在相变点以上(1020℃)热处理获得片层组织,其TEM照片如图4所示。在相变点以上经过一定时间的保温,TC4钛合金丝材片层组织的 $\beta$ 晶粒不断长大,平均尺寸约为300 $\mu\text{m}$ 。在单

个 $\beta$ 晶粒内可以看到不同方向的 $\alpha$ 集束(图4b), $\alpha$ 片的厚度平均约为1 $\mu\text{m}$ ,不同方向的片状 $\alpha$ 相内及 $\alpha/\beta$ 相界面上仍有一定数量的位错(图4c),但位错密度较低。



图4 TC4钛合金丝材片层组织的TEM照片

Fig. 4 TEM images of TC4 titanium alloy wire with lamellar structure: (a) grain boundary  $\alpha$ ; (b)  $\alpha$  bunching; (c) low density dislocation

## 2.2 显微组织类型对力学性能的影响

表2为不同显微组织TC4钛合金丝材的室温拉伸性能。从表2可以看出,等轴组织TC4钛合金丝材的强度最高,这是由于原始等轴组织 $\alpha$ 晶粒细小且具有较高的位错密度。塑性方面,双态组织最好,片层组织最差,这是因为片层组织原始 $\beta$ 晶粒粗大,滑移系少,变形协调能力较弱,导致其塑性较低。

表2 不同显微组织TC4钛合金丝材的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of TC4 titanium alloy wire with different microstructures

Microstructure	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
Equiaxed structure	992	1065	15.9	39.5
Duplex structure	941	1043	17.6	42.6
Lamellar structure	943	1057	11.9	31.8

表3为应力比 $R=0.1$ 时3种显微组织的TC4钛

合金丝材的低周疲劳试验结果。其中, $\sigma_{\max}$ 为最大加载应力。图5为不同显微组织TC4钛合金丝材疲劳试样在不同循环周次下的裂纹扩展长度。由图5可见,当裂纹尺寸 $<250\mu\text{m}$ 时,不同显微组织TC4钛合金丝材对应的裂纹扩展速率有很大差异,片层组织的扩展速率最低,等轴组织最高。但当裂纹长度 $>250\mu\text{m}$ 时,3种组织的裂纹扩展速率无显著差异。等轴组织初始位错密度较高,当裂纹遇到等轴 $\alpha$ 相时直接穿过, $\alpha$ 相界存在的少量残余 $\beta$ 相对疲劳裂纹扩展的阻碍作用较小,因而疲劳寿命较低。片层组织的疲劳寿命最高,这是由于片层组织能够改变裂纹扩展方向以及产生二次微裂纹分支。裂纹扩展中遇到塑性较好的 $\beta$ 相时,扩展路径发生偏转,改为沿 $\alpha/\beta$ 相界面进行,从而使得裂纹总长度增加,消耗的能量也相应增加,疲劳寿命增大。片层组织的疲劳寿命与 $\beta$ 相的厚度密切相关,只有当 $\beta$ 相的

厚度足够大时, 才能够吸收裂纹尖端塑性变形过程产生的能量从而延缓裂纹扩展速率。对于双态组织, 通过增加片状  $\alpha$  相的体积分数(通过提高变形温度或在两相区较高温度热处理)可增大裂纹扩展抗力, 提高疲劳性能。综合考虑 TC4 钛合金丝材的力学性能和工艺塑性, 应选择双态组织作为产品的最终组织状态。

表3 TC4 钛合金丝材的低周疲劳试验结果

Table 3 Results of low cycle fatigue of TC4 titanium alloy wire with different microstructures

Microstructure	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	Fatigue life /cycle	$\sigma_{\max}/R_m$
Equiaxed structure	507	10 700	0.476
Duplex structure	507	12 444	0.486
Lamellar structure	507	20 730	0.480

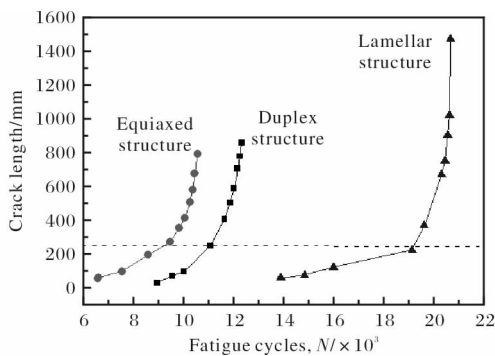


图5 TC4 钛合金丝材疲劳试样的裂纹长度随循环周次的变化曲线

Fig. 5 Curves of crack length vs. fatigue cycles of TC4 titanium alloy wire fatigue specimen

### 3 结论

(1) TC4 钛合金丝材经不同工艺热处理后得到的3种不同显微组织中, 等轴组织  $\alpha$  晶粒最为细小且具有较高的位错密度, 表现出较高的拉伸强度; 双态组织中存在不同形态的  $\alpha$  相, 具有最好的塑性; 片层组织原始  $\beta$  晶粒粗大, 塑性最低。

(2) 片层组织 TC4 钛合金丝材的疲劳性能最好。当疲劳裂纹长度  $< 250 \mu\text{m}$  时, 不同显微组织对应的裂纹扩展速率差异较大, 片层组织的扩展速率最低, 等轴组织最高。当裂纹长度  $> 250 \mu\text{m}$  时, 3种显微组织的裂纹扩展速率无显著差异。

(3) 综合考虑 TC4 钛合金丝材的力学性能和工艺塑性, 应选择双态组织作为产品的最终组织状态。

### 参考文献 References

- [1] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- [2] 陈军, 王廷询, 周伟, 等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 8-12.
- [3] 贾翊, 逯福生, 郝斌. 2020年中国钛工业发展报告[J]. 钛工业进展, 2021, 38(2): 34-41.
- [4] 许天才, 彭晓东, 姜军伟, 等. 钛合金连接异种材料新技术的研究应用[J]. 稀有金属, 2014, 38(4): 711-719.
- [5] 李永华, 张文旭, 陈小龙, 等. 海洋工程用钛合金研究与应用现状[J]. 钛工业进展, 2022, 39(1): 43-48.
- [6] Zorn G, Lesman A, Gotman I. Oxide formation on low modulus Ti45Nb alloy by anodic versus thermal oxidation [J]. Surface & Coatings Technology. 2006, 201(3/4): 612-618.
- [7] Godley R, Starosvetsky D, Gotman I. Corrosion behavior of a low modulus  $\beta$ -Ti-45% Nb alloy for use in medical implants [J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2006, 17: 63-67.
- [8] Feng X J, Macak J M, Sehmuki P. Flexible self-organization of two size-scales oxide annotates on Ti45Nb alloy [J]. Electrochemistry Communications, 2007, 9(9): 2403-2407.
- [9] 张庆玲, 王庆如, 李兴无. 航空用钛合金紧固件选材分析[J]. 材料工程, 2007(1): 11-14+18.
- [10] Ferrero J G. Candidate materials for high-strength fastener applications in both the aerospace and automotive industries [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 691-696.
- [11] Boyer R R, Briggs R D. The use of B titanium alloys in the aerospace industry [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681-685.
- [12] Weiss I, Semiatin S L. Thermomechanical processing of beta titanium alloys - an overview [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 243: 46-65.
- [13] 沙爱学, 王庆如, 李兴无. 航空用高强度结构钛合金的研究及应用[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 239-242.
- [14] 赵庆云, 徐峰. 航空紧固件用钛合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 1021-1023.
- [15] 李华, 贺飞, 马英杰, 等. TC4 钛合金两种显微组织的紧固孔原始疲劳质量研究[J]. 航空材料学报, 2013, 33(2): 81-86.
- [16] 鲁媛媛, 马保飞, 刘源仁. 固溶处理温度对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(6): 153-158.
- [17] 魏鑫, 赵兴东, 李昌永, 等. 热处理制度对 TC4 钛合金风扇盘组织和性能的影响研究[J]. 中国材料进展, 2017, 36(7/8): 588-593.