

# TC16 钛合金板材冷轧工艺及组织性能研究

刘志强<sup>1</sup>, 张青来<sup>1</sup>, 韩伟东<sup>2</sup>, 柏秋生<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

(2. 宝鸡市博信金属材料有限公司, 陕西 宝鸡 721013)

**摘要:** 进行了 TC16 钛合金板材多道次冷轧试制, 利用光学显微镜、扫描电镜和 X 射线衍射等手段研究了变形量对冷轧板材微观组织与力学性能的影响。结果表明:  $\alpha + \beta$  两相 TC16 钛合金板材冷轧加工是可行的, 其极限冷变形量达到 79%, 冷轧板材表面无裂纹。大幅度冷轧变形后, TC16 钛合金组织为分布均匀的纤维状结构, 且存在极少量未充分变形的  $\alpha$  晶粒, 并伴有应变诱导的  $\alpha''$  马氏体相产生; 抗拉强度和显微硬度均得到较大程度的提高, 发生明显的冷形变强化。

**关键词:** TC16 钛合金; 冷轧; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG337.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)01-020-05

## Study on Cold Rolling Technology, Microstructures and Mechanical Properties of TC16 Titanium Alloy Sheets

Liu Zhiqiang<sup>1</sup>, Zhang Qinglai<sup>1</sup>, Han Weidong<sup>2</sup>, Bai Qiusheng<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. Baoji Boxin Metal Materials Co., Ltd., Baoji 721013, China)

**Abstract:** The multi-pass cold-rolled tests of TC16 titanium alloy sheets were produced. The effect of deformation on microstructures and mechanical properties of cold-rolled sheets were studied by optical microscope, scanning electron microscope and X-ray diffraction. The results show that the cold rolling of  $\alpha + \beta$  two-phase TC16 titanium alloy sheets is feasible, and the limit cold deformation can reach 79% without any cracks on the surface. After large-scale cold rolling deformation, the TC16 titanium alloy microstructure becomes a uniformly distributed fibrous structure, and they are few incompletely deformed  $\alpha$  grains, accompanied by strain-induced  $\alpha''$  martensitic phase. Meanwhile, the improvement of tensile strength and microhardness, and obvious cold deformation strengthening is obtained.

**Key words:** TC16 titanium alloy; cold rolling; microstructure; mechanical properties

钛合金紧固件在飞机上使用不仅可以达到减重、耐腐蚀的目的, 而且是钛合金构件与碳纤维复合材料构件连接的最佳连接件<sup>[1,2]</sup>。TC16 (Ti-3Al-5Mo-4.5V) 钛合金属于  $\alpha + \beta$  两相合金, 通过热轧或热拉拔加工成棒材和丝材, 大量用于制备航空紧固件<sup>[3-5]</sup>。退火态 TC16 钛合金棒材或丝材具有良好的冷加工塑性, 其室温冷镦比达到 1:4, 冷镦后可直接使用或固溶时效后使用<sup>[6-8]</sup>。张青来等<sup>[9-11]</sup>对 TC16 钛合金熔炼工艺、锻造、热轧、热处理规范以

及组织性能和冷镦成形等方面进行了大量的前期实验研究, 所研制的 TC16 热轧棒材经退火处理后具有优异的室温成形性能, 如断面收缩率达到 64%, 冷镦变形量达到 80%。冷变形对材料力学性能具有明显的影响, 如冷变形量的增加致使 BT-14 和近  $\alpha$  型 TC2 钛合金板材抗拉强度和硬度得以提高<sup>[12,13]</sup>。经检索, 国内关于  $\alpha + \beta$  两相 TC16 钛合金的研究主要集中在其棒材和丝材的加工方面, 鲜有关于其冷轧板材轧制的报道。

以 TC16 钛合金热轧棒材为研究对象, 通过冷轧实验研究 TC16 钛合金冷轧成形性能, 分析冷轧板材

的组织与力学性能,为今后 TC16 钛合金板材冷轧工艺开发提供必要的技术支持。

## 1 实验

采用真空自耗电极熔化炉 3 次重熔制备直径为 210 mm 的 TC16 钛合金铸锭,其化学成分如表 1 所示。铸锭在  $\beta$  相区开坯,开始和结束温度分别控制在 1150 和 800  $^{\circ}\text{C}$  左右,之后热锻和轧制成直径为 7.72 mm 的棒材。为了提高 TC16 钛合金棒材的冷镦性能,根据前期的研究结果,本实验首先对 TC16 钛合金棒材进行退火处理:将热轧棒材加热至 780  $^{\circ}\text{C}$ ,保温 2 h 后,随炉冷却至 500  $^{\circ}\text{C}$  时空冷。利用磨床去除热处理棒材表面氧化层。经拉伸和冷顶锻试验,退火态 TC16 钛合金棒材性能如表 2 所示。

表 1 TC16 钛合金化学成分(w/%)

Table 1 Chemical composition of TC16 titanium alloy

Al	Mo	V	C	Fe	O	N	H	Ti
2.8	5.2	4.5	0.02	0.05	0.08	0.02	0.001	Bal.

表 2 TC16 钛合金棒材拉伸性能和冷镦性能

Table 2 Tensile properties and cold upset of TC16 titanium alloy bars

$R_m/\text{MPa}$	$R_p/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	Upset ratio
900	880	16	64	1:5

采用两辊轧机对直径为 7.72 mm 的退火态 TC16 合金棒材进行纵向多道次冷轧板材试制试验,以观察合金冷轧成形性能和冷轧变形量对其组织与性能的影响。

从冷轧板材上截取试样。金相试样经过镶嵌、粗磨、精磨和抛光,采用 Kroll 试剂(HF、 $\text{HNO}_3$  和  $\text{H}_2\text{O}$  按体积比 1:2:50 混合)腐蚀。利用 LEICA DM2500M 型正置光学显微镜(OM)和 JEOL JSEM-7001F 型高分辨扫描电镜(SEM)观察和分析材料的微观组织。由于冷轧板材尺寸限制,拉伸试样采用非标准,其尺寸(mm)如图 1 所示。拉伸性能测试采用 KX-WDW 3200 万能试验机完成。使用 HVS-1000Z 型自动转塔数显显微硬度计,沿板材横断面取 3~5 个点测量显微硬度,加载载荷为 4.9 N,保压时间为 15 s。

利用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪对试样进行物相分析,采用  $2\theta$  角连续扫描模式,电压和电流分别为 40 kV 和 200 mA,扫描速度为  $4^{\circ}/\text{min}$ ,扫描范围为  $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。

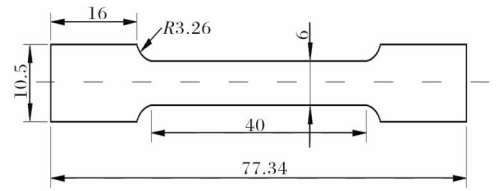


图 1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Size of tensile specimen

## 2 结果与分析

### 2.1 冷轧实验结果

退火态 TC16 合金的纵向多道次冷轧板材试制结果表明,当冷变形量为 73% 时,仅在冷轧板材头部出现微裂纹(见图 2a),板材其他部位未见任何缺陷出现;冷变形量达到 79% 时,板材头部裂纹向内扩展(见图 2b),即冷轧变形达到极限,与前期该合金冷镦极限变形量 80%<sup>[10]</sup> 结果吻合。因此,对 TC16 钛合金进行适当的退火处理,利用其优异的冷镦成形性能,完全可以实施冷轧加工,以代替传统的热轧工艺。

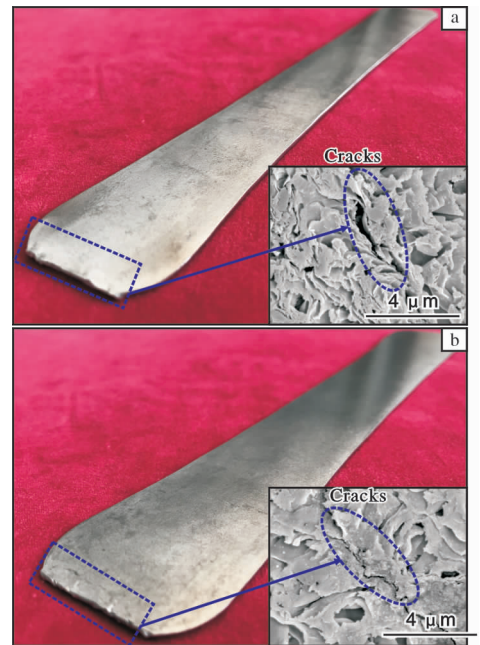


图 2 不同变形量 TC16 冷轧板材照片

Fig. 2 Photos of TC16 cold rolled sheets with different deformations: (a) 73%; (b) 79%

### 2.2 微观组织

图 3 所示为不同冷轧变形量后 TC16 冷轧板材 SEM 照片。退火后的热轧 TC16 钛合金棒材组织由细小的等轴  $\alpha$  晶粒和  $\beta$  相组成,如图 3a 所示。经过

冷轧后,随着冷轧变形量的增加, $\alpha$ 晶粒沿轧制方向逐渐被拉长、破碎,最后完全变成纤维状。当冷轧变形量为18%时,合金内组织变形不均匀,由原始的等轴 $\alpha$ 晶粒和弯曲交错状 $\alpha$ 晶粒以及 $\beta$ 相组成,如图3b所示;当冷轧变形量为39%~47%时,等轴 $\alpha$ 晶粒被拉长,存有一定数量的未充分变形的 $\alpha$ 晶粒,如图3c和3d所示;当冷轧变形量为73%~79%时,等轴 $\alpha$ 晶粒完全被拉长成纤维状,但仍存有极少量的未充分变形的 $\alpha$ 晶粒,且组织分布均匀,

如图3e和3f所示。

图4为TC16冷轧板材的金相组织。由图4可见,冷轧板材组织为与压缩轴线方向垂直的纤维状组织;随着冷轧变形量的增加, $\beta$ 相比比例增加,特别是冷轧变形量达到73%以后,可观察到明显的黑色带状组织,这些黑色带状组织几乎全部为 $\beta$ 相。 $\beta$ 或亚稳 $\beta$ 钛合金剧烈冷轧变形后,组织中除了纤维组织和孪晶外,在高倍透射电镜(TEM)下还可观察到形成的高密度位错<sup>[14,15]</sup>。

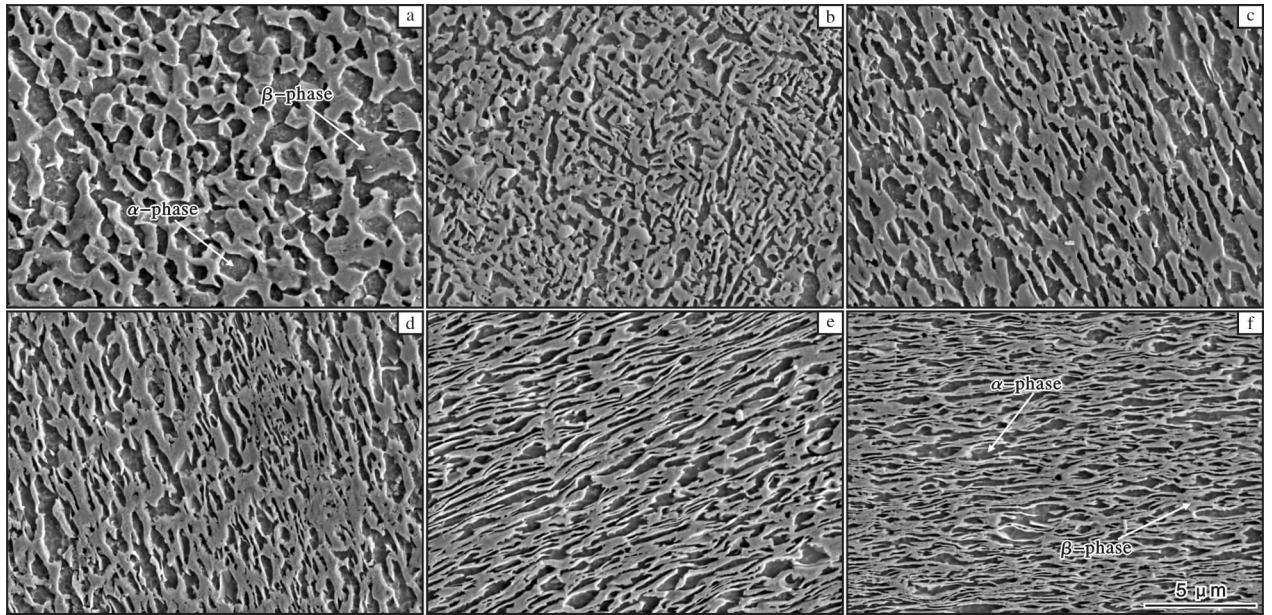


图3 不同变形量TC16冷轧板材的SEM照片

Fig. 3 SEM microstructures of TC16 cold rolled sheets with different deformations: (a) 0%; (b) 18%; (c) 39%; (d) 47%; (e) 73%; (f) 79%

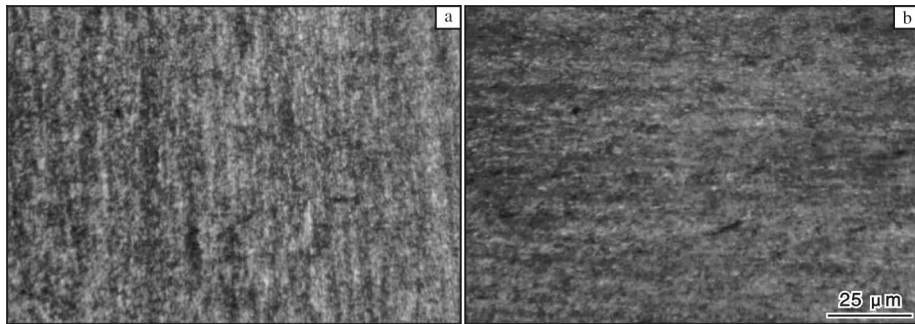


图4 不同变形量TC16冷轧板材的金相组织

Fig. 4 Optical microstructures of TC16 cold rolled sheets with different deformations: (a) 47%; (b) 73%

### 2.3 XRD物相分析

图5为不同冷轧变形量TC16冷轧板材的XRD图谱。从图5可以看出,冷变形量为18%时,在 $2\theta$ 角 $56^\circ$ 附近出现少量的 $\alpha''$ 马氏体相<sup>[16]</sup>;变形量大于

73%时, $\alpha$ 相和 $\beta$ 相峰值强度均得到增强,除了 $56^\circ$ 附近出现少量的 $\alpha''$ 马氏体相外,在 $45^\circ$ 附近发现新的 $\alpha''$ 马氏体相峰,其峰强度随着变形增加而增强,说明在剧烈的冷变形后产生了数量较多的 $\alpha''$ 马氏体相。

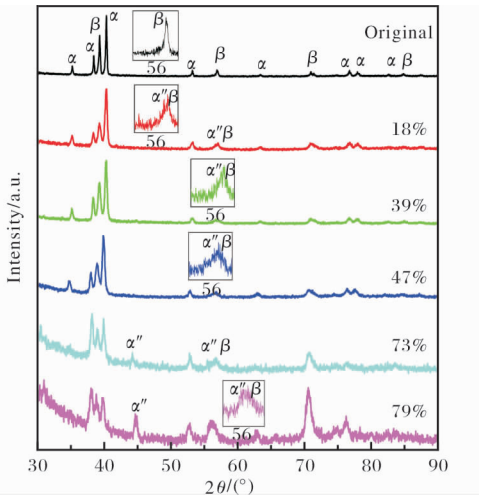


图 5 不同变形量 TC16 冷轧板材的 XRD 图谱  
Fig. 5 XRD patterns of TC16 cold rolled sheets with different deformations

## 2.4 显微硬度和力学性能

### 2.4.1 显微硬度

为了说明冷变形对 TC16 钛合金强化的影响,在冷轧过程中对不同冷轧变形量板材分别取样进行显微硬度测试,结果如图 6 所示。由图 6 可见,TC16 冷轧板材显微硬度随冷轧变形量增大而增加,发生了冷变形强化,其强化程度取决于变形量大小<sup>[17]</sup>。当冷变形量为 39% 时,维氏显微硬度为 3.07 GPa,相比原始态显微硬度(2.96 GPa)提高了 3.72%;此时应力诱发的  $\alpha''$  马氏体相含量很少(见图 5),对其硬度影响较小;之后显微硬度快速增加,当冷变形量为 73% 时,显微硬度为 3.40 GPa,增加了 14.86%,合金板材获得了明显的冷形变强化。除了冷加工硬化和形成的高密度位错外,产生的数量较多的  $\alpha''$  马氏体相也是其影响因素之一。

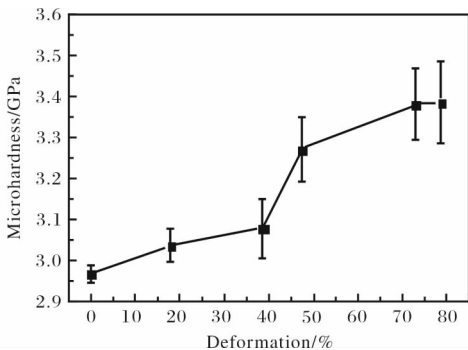


图 6 不同变形量 TC16 冷轧板材的显微硬度  
Fig. 6 Microhardness of TC16 cold rolled sheets with different deformations

### 2.4.2 力学性能

图 7 为不同变形量 TC16 钛合金板材的室温拉伸应力-应变曲线。由图 7 可观察到,热轧棒材经 780 °C 保温 2 h,随炉冷却至 500 °C 空冷后,其室温拉伸应力随应变的增加快速达到最大应力(900 MPa),之后随应变增加而缓慢减小,发生明显的缩颈,最后断裂,延伸率和断面收缩率分别达到 16% 和 64%。不同变形量的冷轧板材室温拉伸应力-应变曲线出现“双屈服”现象(图 7 中箭头所示),第一屈服点“A”是由于少量的亚稳  $\beta$  相在应力驱使下转变成  $\alpha''$  马氏体,即  $\beta \rightarrow \alpha''$  马氏体相变;随着应变的增加,生成新的  $\alpha''$  马氏体所需要的应力超过了  $\alpha$  相或  $\beta$  相屈服强度,应力诱发相变停止,出现第二屈服点“B”。

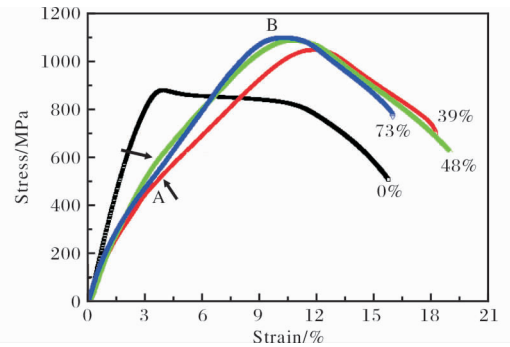


图 7 不同变形量 TC16 冷轧板材的拉伸应力-应变曲线  
Fig. 7 Tensile stress-strain curves of TC16 cold rolled sheets with different deformations

随着冷轧变形量的增加,抗拉强度(最大应力)相应增加,获得不同程度的应变强化。当冷变形量为 73% 时,冷轧板材拉伸断面收缩率为 43.85%,伸长率则为 15.96%,抗拉强度为 1098.7 MPa(约提高 22%)。TC16 冷轧板材得到明显的加工硬化(形变强化),这主要是由于剧烈的冷变形后形成的纤维结构、高密度位错和应变诱发形成的  $\alpha''$  马氏体相所致。

## 3 结论

(1) 利用退火态 TC16 钛合金优异的冷镦性能,对其进行多次冷轧试制,最大冷轧变形量达到 79%,此时板材表面无任何缺陷,仅在板材端部出现裂纹。因此,  $\alpha + \beta$  型 TC16 板材冷轧加工是可行的。

(2) 随着冷轧变形量的增加,  $\alpha$  晶粒沿轧制方向逐渐被拉长、破碎,最后完全变成纤维状。当冷

轧变形量大于 73% 时, 形成分布均匀的纤维状组织, 组织中有极少量未充分变形的  $\alpha$  晶粒, 并产生因剧烈应变诱导的  $\alpha''$  马氏体相。

(3) TC16 冷轧板材室温拉伸应力-应变曲线出现“双屈服”现象, 即发生  $\beta \rightarrow \alpha''$  马氏体相。冷变形量为 73% 时, 合金抗拉强度和显微硬度分别提高了约为 22% 和 14.86%, 得到明显的冷形变强化。

#### 参考文献 References

- [1] 刘风雷, 赵庆云, 庄宝潼. 航空钛合金紧固件高效自动化制造设备发展现状[J]. 航空制造技术, 2016(19): 70-74.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Kolachev B A, Moiseev V N, Ryndenkov D V, et al. Structure and mechanical properties of alloys Ti-2.2% Al-2.2% V-2.2% Mo-2.5% Fe and Ti-2.2% Al-5% Fe equivalent to alloy VT16[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2006, 48(5/6): 240-243.
- [5] Li X W, Lu M X, Sha A X, et al. The tensile deformation behavior of Ti-3Al-4.5V-5Mo titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 490(1/2): 193-197.
- [6] Sha A X, Wang Q R, Li X W. Process analysis of BT16 titanium alloy fastener [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(3): 455-458.
- [7] 吴崇周. 热锻对 TC16 钛合金组织和性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2007(3): 61-64.
- [8] 杨洋, 董利民, 关少轩, 等. 冷锻和热锻对 TC16 合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 107-112.
- [9] 张青来, 匡雁锐, 韩寅奔, 等. Ti-3Al-5Mo-4.5V 合金的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(5): 984-988.
- [10] 张青来, 郭文建, 韩寅奔, 等. Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金棒材冷锻性能及表面微裂纹的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(4): 824-828.
- [11] 张青来, 匡雁锐, 韩寅奔, 等. 冷锻紧固件用 Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金的微观组织及性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2756-2761.
- [12] 王文君, 陈猛, 岳希星. 冷变形对 BT-14 钛合金组织和性能的影响[J]. 世界有色金属, 2019(10): 174-175.
- [13] 唐进, 杨晓康, 王兴, 等. 冷变形率对退火态 TC2 钛合金薄板组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(11): 120-121, 125.
- [14] Markovsky P E, Bondarchuk V I, Matviychuk YU V, et al. Evolution of microstructure, phase composition, and tensile properties of severely cold deformed titanium metastable  $\beta$  alloy in rapid continuous heating [J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2014, 24(5): 1365-1371.
- [15] Lan C B, Wu Y, Guo L L, et al. Microstructure, texture evolution and mechanical properties of cold rolled Ti-32.5Nb-6.8Zr-2.7Sn biomedical beta titanium alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(5): 788-792.
- [16] 李康, 付雪松, 胡建军, 等. TC16 钛合金冷锻变形的特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(6): 1608-1611.
- [17] 刘国怀, 李天瑞, 徐莽, 等. 累积叠轧 TC4 钛合金的组织演化与力学性能[J]. 金属学报, 2017, 53(9): 1038-1046.