单向拉伸中 TB5 钛合金组织转变的原位观察

柳长旭 吴国清 沙爱学 王清瑞

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191) (北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 通过单向拉伸下的视频显微镜原位观察,定量研究了 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (即为 TB5)钛合金显微组织在拉伸过程中的演变规律. 结果表明:单向拉伸时,该钛合金在弹性阶段组织变化不明显,而在塑性阶段随变形量的增加,组织中滑移带的变化可分为单滑移、多滑移和交滑移 3 个阶段. 在单向拉伸过程中,由于滑移带从单滑移进入到多滑移,发生了几何硬化,导致晶粒变化减缓,滑移带的转动幅度变小.

关 键 词: 钛合金; 统计; 显微组织; 拉伸; 滑移带

中图分类号: TG 113.12

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1474-04

Situ observations of structural transformation in TB5 titanium alloy during one way tensile test

Liu Changxu Wu Guoqing

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Sha Aixue Wang Qingrui

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

Abstract: Microstructure transformation in Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al(TB5) titanium alloy during one way tensile test was studied in situ observations of the video microscope. The results show that the change of the microstructure of the titanium alloy in uniaxial tension is not obvious in the elastic stage, but according to the change of the slip bands in the microstructure it can be divided into three stages following with the increase of the deformation in the plastic stage. The three stages are the single slip, the multiple slip and the cross slip. Geometric hardening occurs from the single slip to the multiple slip in uniaxial tension, so the change of the grains slows down and the rotation range of the slip bands is smaller.

Key words: titanium alloy; statistics; microstructure; tensile; slip bands

Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al(简称 Ti-15-3 或 TB5)钛合金作为一种低成本的高强度亚稳 β 钛合金,适合于带材冷轧生产并具有优良的冷成形性能,可在室温下成形中等复杂的板材零件,与热成形相比又可降低生产成本 28% 左右,是一种比较理想的航空结构材料[1-6]. 对于板材性能的评价涉及金属学评价和成形性能评价 2 个方面. 板材拉伸过程中,材料本身的微观组织和这些微观组织在变形过程中的变化则本质地决定了材料的拉伸性能[7]. 文献[8]通过 IF 钢板焊接后的拉伸性能和拉伸变形中的成形性能的比较,发现可以用微观组织来表征 IF 钢板焊接质量. 文献[9]研究了 Ti-15-3 的超塑性,发现在一定温度下的拉伸过程中晶粒的形状尺寸、晶界相界等发生了变化,而这些变化都关系到合金的超塑性. 实际上,拉伸变形过程中晶粒的形状大小与位向的变化、晶界相界特征变化[8-14]等都会影响到材料的变形行为进而影响到板材的成形性能. 因此,有必要深入研究板材

收稿日期: 2011-06-01; **网络出版时间**: 2012-11-26 11:39

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121126.1139.015.html

基金项目: 北京市科技新星计划资助项目(2007B016); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0805)

作者简介: 柳长旭(1986-),男,辽宁鞍山人,硕士生,l050705@163.com.

的微观组织在变形过程中的变化并试图与板材的性能评价结合起来.

本文通过单向拉伸下的金相原位观察实验,从定量分析的角度对钛合金 Ti-15-3 板材组织在拉伸变形过程中的晶粒形状大小和最长直径与最短直径之比的变化、晶粒内部的滑移带数目角度等进行统计研究,探讨了微观组织在不同变形阶段的演变规律.

1　实验材料及方法

本文选用宝鸡有色金属加工厂生产的 Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al 钛合金为实验材料,规格为 1.5 mm厚的板材,其合金化学成分见表 1. 长度方向沿着轧制方向将板材加工成室温拉伸试样,其试样外廓尺寸为 200 mm×20 mm. 拉伸试样经抛光后,采用 Kroll 腐蚀液(成分为 960 mL H_2O+30 mL HNO_3+10 mL HF),对试样进行腐蚀,腐蚀时间为 20 s.

表 1　实验用 Ti-15-3 合金的主要化学成分

合金元素	V	Sn	Al	Cr	Fe	Si	C	H
质量分数/%	15.00	2.81	3.30	2.80	0.12	0.052	0.012	0.001

在 MTS 880 液压伺服实验机上对板材拉伸试样进行室温单向拉伸实验,拉伸速率为 0.5 mm/min. 通过视频显微镜对板材试样中心处金相组织进行观察,原位观察示意图见图 1.

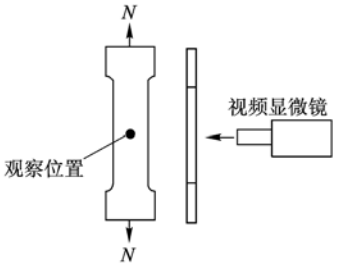
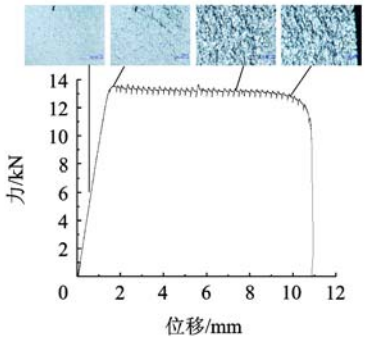


图 1　单向拉伸过程的金相组织原位观察实验示意图

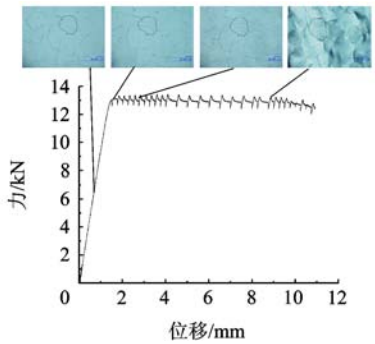
2　结果与讨论

本文分别通过低倍(图 2a,100 倍)和高倍(图 2b,1 000 倍)下的视频显微镜对 Ti-15-3 钛合金单向拉伸过程进行了原位观察. 其中低倍观察试样原位观察区域距试样最终断裂后断裂处 4 mm,高倍观察试样原位观察区域距试样最终断裂后断裂处 8 mm.

从图 2a 中可以看出,Ti-15-3 钛合金的原始晶粒为等轴晶粒,随着拉伸变形过程的进行,黑色区域继续增多且逐渐均匀分布,表面的凹凸变化加剧,金属晶粒逐渐被拉长成纤维状,在纤维状晶粒的内部可以看到许多小晶块,成为形变亚晶或形变胞. 高倍下的单向拉伸过程原位观察(图 2b)可以看出,在弹性阶段金属晶粒仅仅出现形状的变化,沿位移方向被拉长,在塑性变形阶段出现了滑移带. 在塑性阶段的初期,出现了一条滑移带,即产生了单滑移的滑移带,随着拉伸的进行,发生了晶粒转动,导致多滑移的产生,此时发生几何硬化;在拉伸的后期,出现交滑移,直至结束. 在塑性变形以后,晶粒中除形成大量相互平行或交叉的滑移带以外,由于晶粒内各区域开动的滑移系、旋转的方向以及变形的程度不同,晶粒还会分割成许多位向不同的形变亚晶或形变胞. 在 Ti-15-3 钛合金的单向拉伸过程中,其屈服阶段时间很短,在单向拉伸曲线上难以体现,故可以归入塑性阶段.



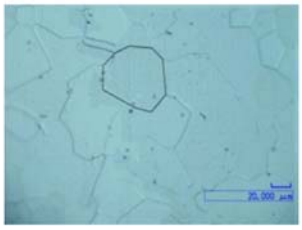
a　100 倍



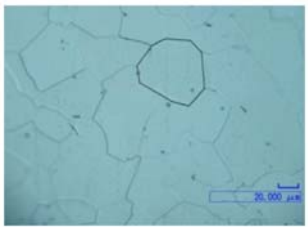
b　1 000 倍

图 2　Ti-15-3 钛合金板材单向拉伸过程中不同变形阶段组织演变图

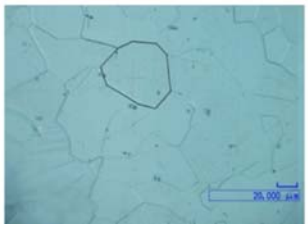
本文定义拉伸过程中不同阶段试样的变形程度为拉伸试样的变形量与最大变形量之比,以视场内黑线圈定的晶粒组织为例对 Ti-15-3 钛合金板材单向拉伸过程中晶粒组织变化进行了进一步分析. 可以看出,Ti-15-3 钛合金的原始晶粒为等轴的 β 单相组织(图 3a). 当变形程度为 9%(图 3b)时,晶粒组织内部未观察到明显变化,仅看到晶粒被拉长. 而当试样的变形程度为 14% 时,观察到晶粒组织内部出现了第 1 条滑移带(图 3c),该滑移带的方向与拉伸方向成 82°,说明晶粒组织已经发生了单滑移,随后又观察到 2 条平行的



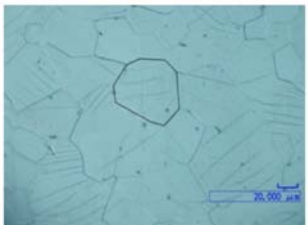
a 原始组织(变形程度为 0)



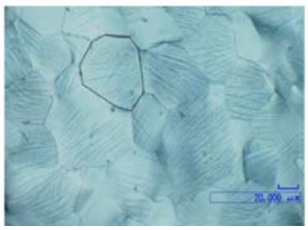
b 变形程度为 9%



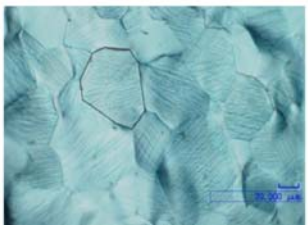
c 变形程度为 14%



d 变形程度为 16%



e 变形程度为 56%



f 变形程度为 84%

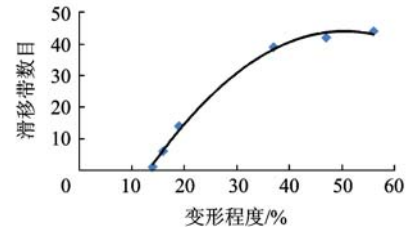
图 3 Ti-15-3 钛合金板材单向拉伸过程中不同变形阶段的组织变化典型照片

滑移带. 随着拉伸过程的继续进行,当试样的变形程度达到 16% (图 3d)时,可观察到出现了另外一组(3 条)与第 1 条滑移带方向不同的滑移带. 2 组滑移带相互交叉,此时发生了多滑移和几何硬化,此时第 1 条滑移带的角度也变为 75°. 进一步拉伸,晶粒表面由于滑移带的大量出现,可观察到明显的凹凸变化. 在试样的变形程度为 56% 时,第 1 条滑移带角度变为 69°,滑移带数目增至 44 条,并呈现波纹状(图 3e),发生了明显的交滑移现象. 在试样的变形程度为 84% (图 3f)时,滑移带已经多得难以计数.

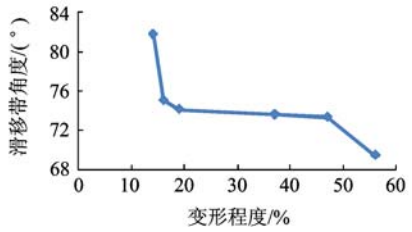
图 4 给出了 Ti-15-3 钛合金板材单向拉伸过程中拉伸变形程度与滑移带数目、角度的变化情况. 可以看出,随着变形程度的增大,可以观测到的滑移带的数目增多并呈抛物线增长的方式(图 4a),其关系式为

$$y = -0.03x^2 + 3.21x - 36.88 \qquad (1)$$

其中,x 为 Ti-15-3 钛合金板材变形程度;y 为滑移带数目. 滑移带的角度则随着变形程度的增大而减小,并出现了一个较为平缓的平台. 这可能是由于滑移带在拉伸过程中,其取向逐渐转向拉伸方向(图 4b),当滑移由单滑移阶段进入多滑移阶段后发生了几何硬化,滑移带难以转动,故而出现了平台现象.



a 滑移带数目

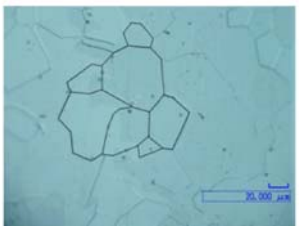


b 滑移带角度

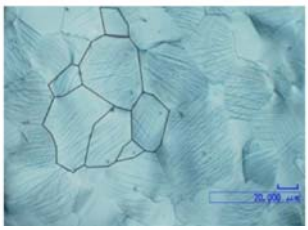
图 4 Ti-15-3 钛合金变形程度与滑移带数目、角度的关系

本文选取 Ti-15-3 钛合金高倍组织中的 7 个晶粒(图 5 中用黑色实线圈定的晶粒组织),统计了它们在拉伸过程中的晶粒面积、晶粒最长直径和最短直径之比的变化情况. 其中,晶粒面积是指用像素表示出来的该晶粒的几何面积,晶粒最长直径是指经过该晶粒几何中心的最长线段,最短直径是指经过该晶粒几何中心的最短线段. 可以看出,Ti-15-3 钛合金晶粒组织随着拉伸的进行,晶粒面积发生了一定的长大(图 6a),晶粒组织的最长直径与最短直径之比则变化不大(图 6b).

综上所述,随着拉伸过程的进行,Ti-15-3 钛

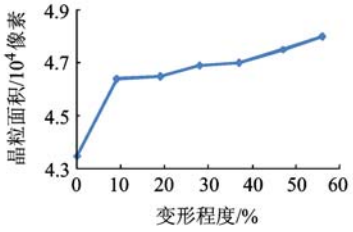


a　原始组织

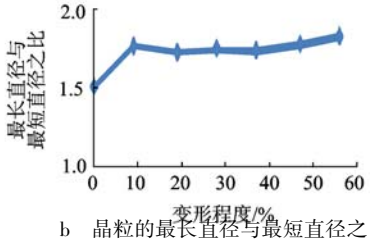


b　变形程度为 56%

图 5　Ti-15-3 钛合金中所选取的统计晶粒示意图



a　晶粒面积



b　晶粒的最长直径与最短直径之比

图 6　Ti-15-3 钛合金不同变形量与晶粒面积(像素)、晶粒的最长直径与最短直径之比的关系

合金的微观组织,如晶粒形状大小、晶粒内部的滑移带数目角度等均发生了明显变化. 钛合金板材的单向拉伸过程主要分为弹性阶段和塑性阶段 2 个部分,其中塑性阶段又可以根据滑移带出现的特征进一步细分为单滑移、多滑移和交滑移 3 个阶段.

3　结　论

1) Ti-15-3 钛合金单向拉伸时,塑性阶段可以根据滑移带出现的特征进一步细分为单滑移、多滑移和交滑移 3 个阶段.

2) Ti-15-3 钛合金在单向拉伸过程中,由于滑移带从单滑移进入到多滑移,发生了几何硬化,导致晶粒变化减缓,滑移带的转动幅度变小. Ti-15-3 钛合金在单向拉伸过程中从单滑移阶段进入多滑移阶段时(变形程度从 14% 到 16%),滑移带的角度变化了 7°;而在多滑移阶段时(变形程度从 16% 到 56%),滑移带的角度变化了 6°.

3) 钛合金板材单向拉伸过程中随着拉伸变形程度的增大,可以观测到的滑移带的数目增多并呈抛物线增长的方式.

参考文献(References)

[1] Zhang Fangzhe, Zhou Qing, Chen Wenjie, et al. Study on two stage superplastic behavior of Ti-15-3 alloy in Beta phase area [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(2): 17-20

[2] Ji Renfeng, Min Xinhua, Hu Hongjian, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical property of Ti-15-3 hot-rolled bar [J]. Rare Metals and Cemented Carbide, 2010, 38(2): 49-52

[3] Huang Deming, Yang Xiongfei, Wei Qingfeng, et al. Cause analysis of fracture for TB5 slab [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2011, 32(1): 23-28

[4] Imam M A, Poulose P K, Rath B B. Beta titanium alloys in the 1990's [M]. Warrendale: The Minerals, Metals and Materials Society, 1993: 261-271

[5] Wang Qingru, Zhang Qingling, Wei Shouyong. Performance data of Ti-15-3 alloy [J]. Materials Engineering, 1996(11): 17-21

[6] Boyer R R. An overview on the use on titanium in the aerospace industry [J]. Materials Science and Engineering, 1996, A213(1/2): 103-114

[7] Chang Rongfu, Chen Xiaodai. Research and experiment of the performance of sheet metal strengthened forming [J]. Aviation Engineering and Maintenance, 1984(1/2): 44-47

[8] Panda S K, Kumar D R, Kumar H, et al. Characterization of tensile properties of tailor welded IF steel sheets and their formability in stretch forming [J]. Materials Processing Technology, 2007, 183(2/3): 321-332

[9] Li Caiju, Gu Jialin, Liu Qing. Superplastic of Ti-15-3 titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 18(4): 52-58

[10] Lee Y S, Kim M C, Kim S W, et al. Experimental and analytical studies for forming limit of AZ31 alloy on warm sheet metal forming [J]. Materials Processing Technology, 2007, 187/188: 103-107

[11] Lindgren M, Bexell U, Wikström L. Roll forming of partially heated cold rolled stainless steel [J]. Materials Processing Technology, 2009, 209(7): 3117-3124

[12] 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

[13] Sanders D G, Ramulu M, Klock-McCook E J, et al. Characterization of superplastically formed friction stir weld in Titanium 6Al-4V: preliminary results [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(2): 187-192

[14] Guo Qiang, Wang Qing, Han Xiuli, et al. Precipitation behavior of α phase and mechanical properties in severely plastic deformed Ti-15-3 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(3): 377-383

(编　辑:文丽芳)