

TA18 钛合金管材织构的表征及测定

张 晖¹, 刘燕平¹, 张旺峰², 颜孟奇², 王玉会²

(1. 西安交通大学 理学院, 西安 710049;

2. 北京航空材料研究院 钛合金室, 北京 100095)

摘 要: 合金织构是决定高强薄壁 TA18 钛合金航空管材综合力学性能的关键因素。针对不同规格、不同工艺条件下制备加工的 TA18 钛合金管材, 利用 X 射线衍射技术对其织构进行测定与分析。对于服役条件不同于其他六方晶系的 TA18 钛合金, 不能用 TC、Kearns f 和 Kallstrom f 等因子来对织构进行定量表征, 而应采用晶体取向分布函数(ODF)的两个极密度值及管径向与最大极密度点的夹角这 3 个参数。确立织构表征方法为研究管材织构尤其是织构密度对力学性能的影响奠定了基础。

关键词: TA18 钛合金; 管材; 织构; 极图; ODF

中图法分类号: TG146.2⁺³

文献标志码: A

Texture characterization in TA18(Ti-3Al-2.5V) aircraft seamless tubing

ZHANG Hui¹, LIU Yan-ping¹, ZHANG Wang-feng², YAN Meng-qi², WANG Yu-hui²

(1. School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Titanium Alloy, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Alloy texture is a key impact on mechanical properties of high strength thin-wall TA18 tubing. The textures of different specification TA18 titanium alloy tubings manufactured by different processes were investigated by means of X-ray diffraction, and texture types and intensity of tubing were characterized by the pole figure and ODF. The pole figure and various quantitative parameters exist severe shortage when representing textures. It is appropriate to describe the tubing texture that the density of peak maximums in ODF and the included angle between the radial direction and the texture component were proposed. Based on the correct method, the study of texture effects on the mechanical behavior can be pushed on.

Key words: TA18 Ti alloy; tubing; texture; pole figure; ODF

TA18 钛合金性能介于 TC4 和纯钛之间, 不仅具有良好的室温、高温力学性能和耐蚀性能, 而且具有优异的冷、热加工塑性、成型性和焊接性能。该合金是先进飞机管路系统, 如液压管路、引气管路、燃油管路等中的首选材料之一^[1-2], 主要工作温度达 315℃, 并具有一定强度和抗氧化性要求。20 世纪 70 年代后, 国际上开始把该合金使用在各种型号的飞机上。与钛合金板材和棒材相比, 钛合金管材的研制和加工难度更大, 我国目前正对这种合金进行研究和开发^[3]。

在钛合金管材工业生产中, 一般均有塑性变形过程(如轧制、拉拔、挤压), 易形成织构, 且变形量越大, 产生的织构越强烈, 多晶材料的各向异性越明显。研究和实践表明, 合金织构这一晶体学基本参量是引起钛合金性能变化的一个重要冶金因素, 必须加以控制^[4-5]。钛单晶为密排六方晶系, 各向异性明显, 如平行于[0002]晶向的弹性模量 $E_{[0002]}=143.3$ GPa, 而垂直于[0002]晶向上的弹性模量 $E_{\perp[0002]}=104.4$ GPa, 热膨胀系数在上述两个方向差一倍等^[6-8]。薄壁管材中壁厚

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(61179068)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 张 晖, 副教授, 博士; 电话: 029-82626623; E-mail: zhanghui@mail.xjtu.edu.cn

方向是薄弱的方向,材料在该方向应增强,因此,径向织构,即六方晶胞的 c 轴平行于管材的径向,是有利织构的。管材的性能需要由织构分布和强弱决定,因此,准确获得管材织构的定量表征是了解管材性能的基础。采用极图或以极图为基础的各种参数表征材料的织构,仅能定性反映织构的类型,不能准确反映不同材料同一类型织构的差别。在此,利用 X 射线衍射法测定了不同工艺 TA18 钛合金管材的织构,比较不同表征方法的差异并分析其中的原因,提出描述 TA18 钛合金管材织构的优化方法。

1 实验

本试验采用 X 射线衍射技术对管材表面进行织构测试。测试仪器为德国 Bruker D8 Advance X 射线衍射仪,选用 Cu K_α 射线,电压为 40 kV,电流为 40 mA,步长 $\Delta\chi=5^\circ$, $\Delta\phi=5^\circ$,扫描范围 χ 为 $0\sim70^\circ$, ϕ 为 $0\sim355^\circ$, $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$;样品台为尤拉环,1.0 mm 准直管,0 维 LYNXEYE 探测器模式, Ni 滤波。并通过测试数据绘制出不同试样的 (0002)、 $(10\bar{1}0)$ 、 $(10\bar{1}0)$ 、 $(10\bar{1}2)$ 、 $(11\bar{2}0)$ 的 5 个晶面极图;同时,根据实测的极密度函数计算出取向分布函数,进而获得取向空间中具有代表性的 $\phi_2=0^\circ$ 截面的取向分布函数的图像表达。极图、Kearns 因子及 ODF 的绘制采用德国 Bruker 公司提供的 TEXEVAL V2.5 软件。

2 结果与讨论

2.1 极图

图 1(a)和(b)分别是名义尺寸为($d19.05\ \text{m}\times0.990\ 6\ \text{mm}$)的管材 1 和 2,其中 AD、TD、RD 分别指向管材轴向、切向(或周向)、径向。从图中可以看出,对于 1#管材, (0002)面极图存在两个明显的密度极值点,其织构强度等级达到 3.55;极图表明,晶粒基面法线主要沿径向分布,属径向织构,但基极分裂,晶粒向 TD(切向)方向倾斜,角度在大约 $\pm 30^\circ$ 范围内。2#管材,同样是 (0002)面极图出现两个极为明显的密度极值点,其织构等级强度达到 3.16,与较 1#管材相比,织构等级强度下降 12.3%。从极图中可以看出,同样基极产生分裂,仍沿径向分布,最大值处晶粒倒向 TD 方向约 $\pm 30^\circ$ 。

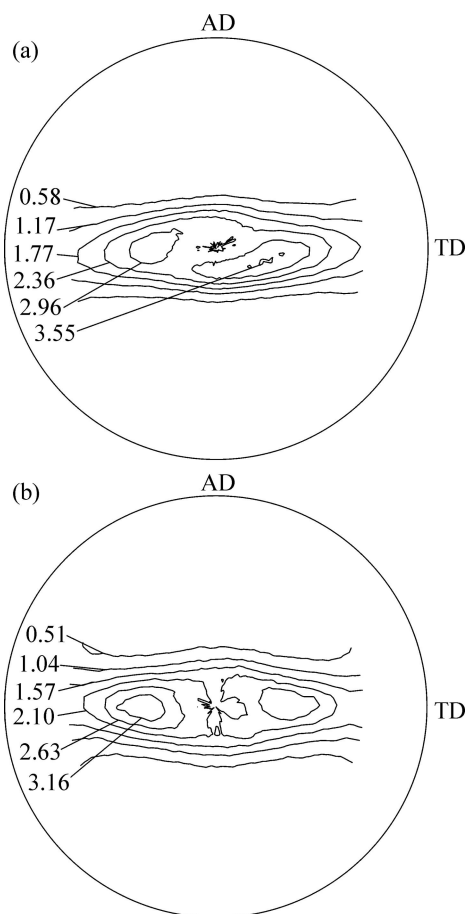


图 1 TA18 管材样品的(0002)极图

Fig. 1 (0002) pole figures of TA18 tubing samples 1 (a) and 2 (b)

2.2 织构定量表征参数

极图和反极图实质上是定性的织构表示方法。也有很多学者提出各种参数来定量地表征织构。其中使用较多的有以下几个参数:织构系数(TC), Kearns f 因子, Kallstrom F 因子^[5,9]等。

标准织构系数(TC)表征在一定角度范围内的试样表面的强度(I/I_0)。假设每个强度都有一个角度与之对应,则对于任何一个在 $\theta\sim2\theta$ 范围内扫描的衍射面 (hkl),都能从标准的完整强度网中找出对应的织构系数(TCs),将其作如下定义:

$$TC_{(hkl)} = \frac{I_{(hkl)} / I_{0(hkl)}}{(1/N)(\sum I_{(hkl)} / I_{0(hkl)})} \quad (1)$$

式中: $I_{(hkl)}$ 和 $I_{0(hkl)}$ 分别是测得的样品强度和晶粒随机取向强度; N 是参与衍射的衍射面总数。

1982 年, KEARNS 提出了取向参数 f , 定义为极轴沿特定方向排列的晶粒有效百分数,它代表了试样内部晶粒基轴沿不同方向分布的几率,因此, f 能用来

表征材料内部晶粒的取向分布状态，从而为材料沿各个方向的宏观性能做出有效的分析和预测。

$$f = \int_0^{\pi/2} I_\phi \sin \phi \cos^2 \phi d\phi \tag{2}$$

式中： I_ϕ 表示晶粒随机取向频次， $I_\phi \sin \phi$ 表示 c 轴与参考方向成 ϕ 角度的晶粒体积分数。

1972 年，KALLSTROM 提出了从极图中直接计算用以表征组织的另一种参数 F ，

$$F = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_\phi \cos \phi \sin \phi d\phi \tag{3}$$

式中： I_ϕ 是指在 ND-TD 平面中标准极点强度。由于基面组织的 ND-RD 和 ND-TD 纵剖图与基面极图一致，故 Kallstrom F 因子与有效基极峰值夹角的关系可通过式(4)表示：

$$F = \cos 2\bar{\phi} \tag{4}$$

由于 $\theta \sim 2\theta$ 扫描比极图更易获得，所以通常不使用 F 因子，但 F 因子的优点在于可在任何应用类型中替代 Kearns f 因子使用。

表 1 管材的 Kearns 因子

Table 1 Kearns factors of tubings			
Sample No.	K_R	K_A	K_T
1	0.551 4	0.094 4	0.354 2
2	0.521 7	0.121 5	0.356 8

K_R 、 K_A 和 K_T 分别代表(0002)晶面的晶粒在管材的径向、轴向和切向分布的权重系数，即 Kearns 因子。样品 1 仅比样品 2 的 K_R 提高 5.6%

2.3 ODF

三维取向分布函数(ODF)法用 X 射线衍射方法测得实验极图数据，即通过测定组织材料的 3~5 个极图，然后用计算方法求得，是组织的定量表达方法。图 2(a)和(b)所示分别为钛合金管材 1#和 2#的 $\varphi_2=0^\circ$ 时的 ODF 截图，表 2 列出了与之对应的组织组分。

ODF 截面图的两个极值点分别对应的是双重组织，计算^[4]结果如表 2 所示。它们虽然同为径向组织，但差别十分明显。样品 2 的组织组分指数 (0002)[1 $\bar{1}$ 00]密度比样品 2 的高 66.8%，样品 1 的组织组分 ($\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 5)[10 $\bar{1}$ 0]比样品 2 组织组分 ($\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 4)[10 $\bar{1}$ 0]的密度高 37.2%，而且样品 1 管径向与最大极密度点的夹角也比样品 2 的小。因此，样品 1 的径向组织比样品 2 的样品强很多，而非极图和

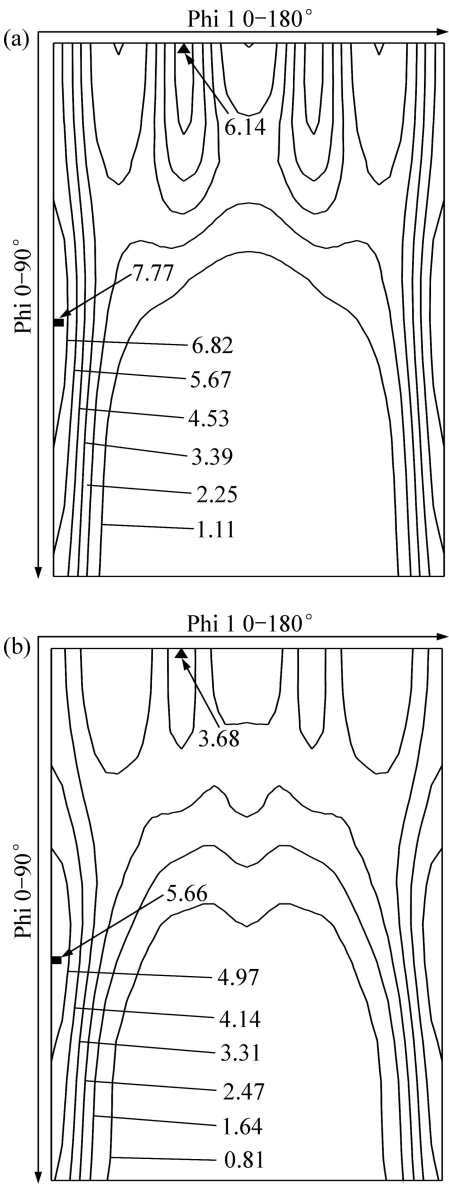


图 2 TA18 钛合金管材的 $\varphi_2=0^\circ$ ODF 截图
Fig. 2 ODF cuts of Ti alloy tubing at $\varphi_2=0^\circ$: (a) Sample 1; (b) Sample 2

表 2 由 ODF 确定的钛合金管材组织组分

Table 2 Texture components determined from ODF				
Sample No.	Euler angle ($\varphi_1, \Phi, \varphi_2$)/($^\circ$)	Texture component	Tilt angle between radial and (0002)/($^\circ$)	Density level
1	(0,35,0)	($\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 5)[10 $\bar{1}$ 0]	32.4 $^\circ$	7.77
	(60,0,0)	(0002)[1 $\bar{1}$ 00]	0 $^\circ$	6.14
2	(0,40,0)	($\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 4)[10 $\bar{1}$ 0]	38.5 $^\circ$	5.66
	(60,0,0)	(0002)[1 $\bar{1}$ 00]	0 $^\circ$	3.68

Kearns 因子表示出 12.3%和 5.6%的差别。

钛合金的变形和断裂是由于位错的滑移以及孪生的出现^[10], 它们是沿特定的滑移面和滑移方向, 或孪生面和孪生方向进行的。而极图和以(0002)晶面计算出的 Kearns 因子只是反映晶面的偏聚的情况, 丢失了两维空间信息, 因此, 它们不能准确地表示钛合金管材的织构, 无法与力学性能建立联系。采用 ODF 的信息对织构进行比较, 并预测力学性能是较好的方法。

3 结论

1) 不同工艺规格的样品 1 和样品 2 TA18 钛合金管材的织构类型同为径向织构。极图上, 样品 1 的最大极值点密度比样品 2 的高 12.3%, (0002)面的径向 Kearns 因子仅增加了 5.6%。

2) 当采用 ODF 表示织构时, 样品 1 比样品 2 织构明显增强, 样品 1 的织构组分指数(0002)[1 $\bar{1}$ 00]密度比样品 2 的高 66.8%, 织构组分($\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 5)[10 $\bar{1}$ 0]比样品 2 织构组分($\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 4)[10 $\bar{1}$ 0]的密度高 37.2%, 而且样品 1 管径向与最大极密度点的夹角也比样品 2 的小。该法与极图和 Kearns 因子有十分显著的差别。

3) 采用晶体取向分布函数(ODF)的两个极密度值及管径向与最大极密度点的夹角这 3 个参数描述钛合金管材织构比较准确。

REFERENCES

- [1] 江志强, 杨 合, 詹 梅, 许旭东, 李光俊. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 44-50.
JIANG Zhi-qiang, YANG He, ZHAN Mei, XU Xu-dong, LI Guang-jun. State of the arts and prospectives of manufacturing and application of titanium alloy tube in aviation industry[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 44-50.
- [2] 孟庆兰, 关淑敏, 李 中. 世界航空钛市场现状及发展趋势[J]. 钛工业进展, 2011, 28(2): 1-3.
MENG Qing-lan, GUAN Shu-min, LI Zhong. The current status and development of the world aerospace titanium market[J]. Titanium Industry Progress, 2011, 28(2): 1-3.
- [3] 张旺峰, 李 艳, 王玉会, 曹春晓. Ti-3Al-2.5V 钛合金管材研究进展[J]. 材料导报 A, 2011, 25(12): 133-137.
ZHANG Wang-feng, LI Yan, WANG Yu-hui, CAO Chun-xiao. Research progress in Ti-3Al-2.5V alloy tube[J]. Materials Review A, 2011, 25(12): 133-137.
- [4] WANG Y N, HUANG J C. Texture analysis in hexagonal materials[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81(1): 11-26.
- [5] MURTY K L, CHARIT I. Texture development and anisotropic deformation of zircaloys[J]. Progress in Nuclear Energy, 2006, 48(4): 325-359.
- [6] MEREDITH S E, SCHEMEL J H. Effect of crystallographic Texture on Flexure properties of Ti-3Al-2.5V hydraulic tubing[J]. Journal of Testing and Eval, 1990, 18(2): 98-105.
- [7] McDARMAID D S, PARTRIDGE P G. The effect of strain rate, temperature and texture on anisotropic deformation in Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Science, 1986, 21(5): 1525-1532.
- [8] PETERS M, GYSLER A, LUTJERING G. Influence of texture on fatigue properties of Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1984, 15(8): 1597-1605.
- [9] GRUBER J A, BROWN S A, LUCADAMO G A. Generalized Kearns texture factors and orientation texture measurement[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 40(3): 176-182.
- [10] CHEN Yong, XU Wen-chen, SHAN De-bin, GUO Bin. Microstructure evolution of TA15 titanium alloy during hot power spinning[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(S): s323-s328.

(编辑 杨 华)