

TA18 钛合金航空管材织构沿层深的分布

盛泽民¹, 张 晖¹, 张旺峰², 王玉会², 颜孟奇²

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

(2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 利用 X 射线衍射技术对冷轧制备的 TA18 钛合金航空管材沿壁厚内、中、外 3 层的织构进行测定与分析, 还测试了由织构决定、且能反映管材各向异性特性的收缩应变比 (contractile strain ratio, CSR)。结果表明: 管材织构强度沿层深会形成较大的梯度变化, 通过晶体取向分布函数 (ODF) 的峰值密度显示的织构梯度变化大于 17%, 特别是各层的织构的类型也存在很大差别。仅采用减薄展平法取管材中层织构评定管材性能时, 即使织构强度等级较高, 也会出现 CSR 下降的情况, 原因在于, 管材存在沿层深不一致的织构分布, 出现有利的径向织构和不利的切向织构共存的情况, 不利织构分数过大, 将导致其 CSR 值降低。确定织构沿层深的分布为进一步预测并改进管材的力学性能提供参考, 并为改善生产工艺提供依据。

关键词: 钛合金; 织构; 取向分布函数; 梯度

中图分类号: TG146.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)10-3073-04

TA18 合金 (Ti-3Al-2.5V) 是一种近 α 型钛合金, 它兼顾良好的强塑性、耐腐蚀性和其他性能, 且其抗疲劳强度和抗裂纹扩展能力较高, 在航空航天、车辆工程、船舶及医学等领域得到了很广泛的应用, 尤其是可作为飞机液压管路系统的优选材料^[1,2]。织构, 即晶体的择优取向会使多晶体出现性能的各向异性。由于 α 钛为密排六方结构, 其对称性较低, 滑移系也较少, (0002) 晶向的强度大于晶体的其他方向, 因此在其加工变形过程中极易产生织构, 导致各向异性。目前中国薄壁钛合金管生产多采用冷轧的生产方式, 其过程主要包括斜轧/钻孔制取管坯、轧制管材和后续处理等, 其中管材轧制过程决定了管材的织构类型和分布, 不同的织构组分会影响其蠕变性能、拉伸性能、疲劳性能和成型性能。近年来, 钛合金织构与其各项性能的关系的研究日益得到重视, 织构增强已成为改善管材性能和改良生产工艺的一个重要方法和途径^[3,4]。

管材生产过程产生的应力和应变随轧制工艺而变化, 如果轧制过程中以壁厚减薄为主, 则管材径向的压缩应力更强, 若轧制时以管材减径为主, 则管材切向的压缩应力较大。应力的不同会使晶体产生不同方向的滑移和孪生, 从而形成各种类型和强度的织构, 因此管材的减壁量 R_w 与减径量 R_D 的比值 Q 是轧制过程中控制织构的组分和管材性能的重要工艺参数^[5-7]。

实际上制备管材的 Q 值沿管材壁厚并非一致, 可能存在不同的切向或径向变形, 并可能因此产生织构组分的不同及其强度沿壁厚方向的梯度变化。锆合金作为核反应堆的包壳材料, 对其织构有所研究^[8-10], 锆合金管材织构沿层深分布的研究也被关注^[11,12]。虽然钛合金与锆合金具有类似的晶体结构, 但锆合金和钛合金在强度、塑性等方面仍有较大的差别, 而关于钛合金管材织构沿层深的分布研究尚未见报道。目前的研究均使用管材中层的织构来代表整个管材的织构, 尤其对于钛合金。文献[13]、[14]中都是用管材一层的织构来表达整个管材的织构状况, 忽略了织构类型及强度沿管材壁厚的变化。本实验针对不同工艺制备的 2 种 TA18 管材内、中、外 3 层的织构成分与强度进行测试, 利用取向分布函数 (ODF) 来表征织构, 探究管材织构的准确表征方法。同时, 测定其对应的收缩应变比, 对比分析得到管材织构沿层深的分布特征及其与管材性能的关系, 以期为管材性能评估和生产工艺的改进提供依据。

1 实 验

织构样品制备: 本实验试样为冷轧的 TA18 合金管材, 名义尺寸外径 15.9 mm, 壁厚 0.838 mm。测试的内、中、外 3 层织构分别是距管材内壁表面约 0.1 mm

收稿日期: 2016-10-08

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); 航空科学基金资助项目 (JZ20141106)

作者简介: 盛泽民, 男, 1990 年生, 硕士, 西安交通大学理学院材料物理系, 陕西 西安 710049, 电话: 029-82626623, E-mail: m15090359861@163.com

处，管壁中部，距管材外壁表面约 0.1 mm 处的织构，如图 1a 所示。样品的制备过程如下：首先将管材用线切割切成 25 mm 长的 3 段，采用化学腐蚀的方法进行壁厚减薄，腐蚀液配比为硝酸:氢氟酸:水=1:1:8。除中间层外，其他位置进行单边腐蚀处理。待腐蚀完成后，裁剪成 10 mm×15 mm 试样，标明轴向 (AD) 与切向 (TD)，展平粘贴在玻璃片上，如图 1b 所示。此时管材失去刚度，展平不会发生塑性变形，从而保证管材原有织构不变。

织构测试：采用 X 射线衍射技术对管材织构进行测试，所用仪器为德国布鲁克 D8 Advance X 射线衍射仪，Cu 靶的 $K\alpha$ 射线，波长为 0.154 nm，电压 40 kV，电流 40 mA，尤拉环的倾角 χ 扫描范围为 $0^\circ\sim 70^\circ$ ，转动角 ϕ 为 $0^\circ\sim 360^\circ$ ，步长均为 5° 。通过测试及散焦修正，绘制内、中、外 3 个样品的 (0002)、 $(10\bar{1}0)$ 、 $(10\bar{1}1)$ 、 $(10\bar{1}2)$ 、 $(10\bar{2}0)$ 5 个晶面的织构极图，并根据极图计算其取向分布函数图，ODF 的绘制采用德国 Bruker 公司提供的 TEXEVAL V2.5 软件。

CSR 测试在拉伸力学试验机上进行，由定义知^[15]：

$$CSR = \varepsilon_c / \varepsilon_r \quad (1)$$

其中， ε_c 表示周向真实应变， ε_r 表示径向真实应变。

周向真应变

$$\varepsilon_c = \ln(D/D_0) \quad (2)$$

D 为变形后直径， D_0 为变形前直径。

轴向真应变为

$$\varepsilon_a = \ln(L/L_0) \quad (3)$$

L 为变形后轴向长度， L_0 为变形前轴向长度。

根据金属在达到应力极限之前均匀塑性变形体积不变的原理可得径向真实应变

$$\varepsilon_r = \varepsilon_c - \varepsilon_a \quad (4)$$

将式 (2)、(3)、(4) 代入式 (1) 可得 CSR 值。在轴向发生 3% 塑性变形时测量上述数据。

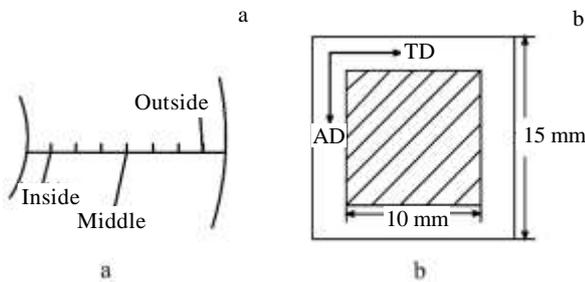


图 1 织构取样位置及织构试样示意图

Fig.1 Texture sampling position (a) and XRD measurement sample (b)

2 结果与讨论

晶体取向分布函数^[16]是用三维的取向空间来表达三维的取向分布问题的方法，该方法采用欧拉角 ($\varphi_1, \phi, \varphi_2$) 来表达空间取向，可将试样的轧向、横向和轧面法向同时在晶体学取向空间表示出来，通过测试样品的多个晶面的极图，并通过特定的方法计算得出。它克服了极图与反极图仅是反映晶面取向，无法完整地表达三维空间晶体取向的问题。文献[17]分析表明，极图数据不能定量地比较管材试样间有利织构的强弱，因此本研究中用 ODF 方法表征织构，避免分析结果的不完整、不准确甚至误判。

收缩应变比 CSR 是表征管材织构引起管材力学性能各向异性的一个直接指标。根据变形金属体积不变原理，在轴向拉力下出现均匀塑性变形时，轴向拉伸必将伴随着径向和周向的变形，但变化前后体积不变。收缩应变比即为管材轴向真实塑性应变和径向的真实应变的比值，是表征材料在受到拉力或压力时抵抗厚度变化能力的重要参数。本实验测得样品 1 号管材的收缩应变比值为 0.95，说明管材的径向和切向变形能力相当，甚至径向，即管材壁厚方向更容易变形，在管壁厚度这一方向上材料的强度较低。0.95 的收缩应变比低于航空液压管材 $CSR > 1.3$ 的产品性能标准，试样未能达到使用标准。2 号管材收缩应变比值为 2.19，满足该标准，说明通过径向织构增强，即垂直于管材表面的 (0002) 基极占优势，使该管材壁厚方向的强度大于管材切向，当管材塑性变形时，主要通过管材直径的收缩而非壁厚减薄的方式进行，这样在管材压扁、扩口及疲劳等过程中，抗破裂能力提高。

通过计算分析 ODF 图可知，ODF 峰值位于 $\varphi_2 = 0$ 的截面内。

图 2a, 2b, 2c 所示分别为实验 1 号管材的管壁内、中、外 3 个部分的 $\varphi_2 = 0$ 的 ODF 截图。ODF 峰值由箭头指出，这 3 张取向分布图分别由对应的 (0002)、 $(10\bar{1}0)$ 、 $(10\bar{1}1)$ 、 $(10\bar{1}2)$ 、 $(10\bar{2}0)$ 5 个晶面的极图计算得到。

Bunge 提出的取向分布函数中 ($\varphi_1, \phi, \varphi_2$) 与织构表达式 ($hkil$) [uvw] 之间的解析关系为：

$$\begin{bmatrix} h \\ k \\ i \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & -1/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sqrt{3}/2 & -1/2 & 0 \\ 0 & 0 & c/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \varphi_2 \sin \phi \\ \cos \varphi_2 \sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ t \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ -2/3 & -1/3 & 0 \\ 0 & 0 & c/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \phi \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ -\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \phi \\ \sin \varphi_1 \sin \phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

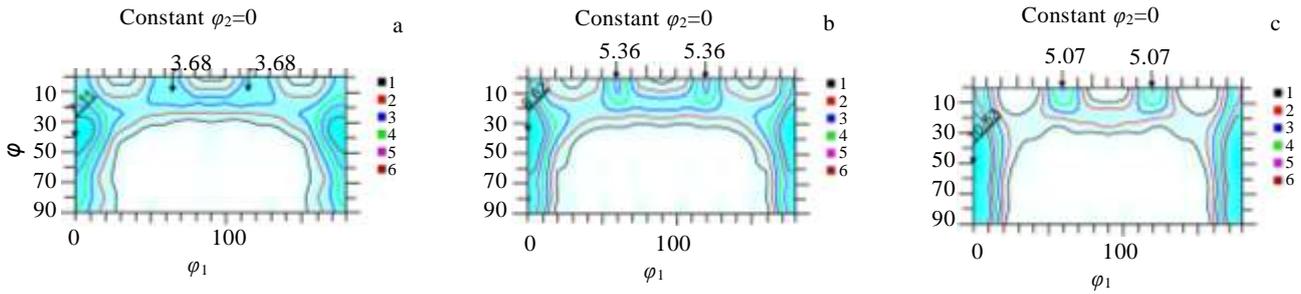


图 2 1 号实验管材的内、中、外 3 层的 ODF 截图 ($\varphi_2=0$)

Fig.2 ODF cut of inside (a), middle (b), outside (c) of the tested tube 1 ($\varphi_2=0$)

将由分析 ODF 截图得到的峰值欧拉角 ($\varphi_1, \phi, \varphi_2$) 代入式(5)中可以得到管材各层的织构组分及其强度, 如表 1 所示。

1 号管材内层织构类型基本组成为 $(\bar{1}2\bar{1}4)[10\bar{1}0] + (0002)[1\bar{1}00]$, 中层为 $(\bar{1}2\bar{1}4)[10\bar{1}0] + (0002)[1\bar{1}00]$, 外层为 $(\bar{1}2\bar{1}3)[10\bar{1}0] + (0002)[1\bar{1}00]$, 内、中、外 3 层主织构的 (0002) 面与径向夹角分别为 $38^\circ, 38^\circ, 46^\circ$ 。该夹角如小于 45° , 织构类型是径向织构, 且夹角越小, 织构强度越大, CSR 应越大, 管材性能越好; 大于 45° 则是切向织构, 属于不利织构。3 层之间, 内层与中层主织构类型相同, 属径向织构。外层主织构与内、中两层不同, 为切向织构。3 层的次织构类型相同。用取向分布函数表征的主织构等级沿管壁层深方向由内到外逐渐增强, 主织构等级由内到外分别是 7.11, 8.62, 10.53, 层级间变化梯度大于 17%。次织构等级强度分别为 3.68, 5.36, 5.07, 也存在变化梯度。尽管不同层深的织构强度均较高, 但该管材最外层出现了切向不利织构, 而且强度最高, 体积分数也最高, 达 30%, 抵消 2 个其他层深位置有利织构的作用, 导致 CSR 值降低为 0.95。

目前钛合金管材的生产多采用冷轧工艺, 通过控制管材的减壁量与减径量的比值 Q 来控制管材的织构

类型及其分布, 以期获得所需的高强度的径向织构, 从而达到所需性能。本实验中所用的样品出现较大的织构梯度分布, 说明轧制过程中该 Q 比值沿管壁径向并不是均匀分布的, 从而造成管材内各层径向有效压缩应力与切向应力的相对强度不同, 故而使沿壁厚方向不同位置的变形量不同, 最终导致织构的不均匀分布。分析原因可能在于, 轧制时管材外壁与轧辊的接触面上存在摩擦力, 使得管材表面产生较强的剪切力, 金属流动与内部不一致。其次, 在轧制过程中, 为了避免轧槽侧边先与工作锥接触造成管坯卡伤, 轧槽侧翼必须有足够的开口。金属在沿着轧制方向流动的同时, 也会向侧翼开口中流动, 造成两个侧面在轧制时的变形量比其它部分小, 沿轧制方向的延伸变形小, 该不均匀变形也会使管材外壁形成较强的切向不利织构, 造成织构的不均匀分布。第 3 个原因, 该管材收缩应变比值为 0.95, 也与轧制时减壁量与减径量的比值 Q 太小有关, 使得管材径向织构分布比例较小, 而且管壁织构较为分散, 内、中、外 3 层主织构 (0002) 面与径向的夹角分别为 $38^\circ, 38^\circ, 46^\circ$, 出现不利织构, 导致这种管材抵抗壁厚变化的能力较弱。2 号试样的中层织构无论是类型和强度都弱于 1 号管材试样, 且体积分数也小于 1 号试样, 但 2 号试样的 CSR 却明显

表 1 管材内、中、外各层的织构组成

Table 1 Texture component of inner layer, middle layer and out layer

Position	Euler angle, ($\varphi_1, \phi, \varphi_2$)/($^\circ$)	Texture component	Included angle with(0002)/($^\circ$)	Contour level	Volume fraction, ($r=15^\circ$)/%	CSR
Tube 1	Inside	$(\bar{1}2\bar{1}4)[10\bar{1}0]$	38	7.11	25	0.95
		$(0002)[1\bar{1}00]$	0	3.68	15	
	Middle	$(\bar{1}2\bar{1}4)[10\bar{1}0]$	38	8.62	27	
		$(0002)[1\bar{1}00]$	0	5.36	19	
	Outside	$(\bar{1}2\bar{1}3)[10\bar{1}0]$	46	10.53	30	
		$(0002)[1\bar{1}00]$	0	5.07	18	
Tube 2	Middle	$(\bar{1}2\bar{1}4)[10\bar{1}0]$	38	7.56	24	2.19
		$(0002)[1\bar{1}00]$	0	4.32	17	

优于 1 号试样, 说明用中间层的织构代表整个管材的织构是不准确的, 难以解释 CSR 的变化规律。

3 结 论

1) 管材织构强度沿层深方向分布会出现较大梯度, 且强度等级变化大于 17%。各层织构类型不同。管材某一层的织构状况并不能代表整个管材的织构分布情况。

2) 即使管材中层的织构类型为有利的径向织构且强度等级较强, 其 CSR (塑性应变比) 也可能较低, 原因是管材的织构沿层深分布较为分散, 在不同的层深处出现了很强的切向不利织构, 抵消了有利织构的作用。

3) 管材轧制工艺可以从适当选取 Q 值, 使用合适的润滑剂以减小轧辊与管材外壁之间的摩擦以及进一步规范轧辊轧槽形状来改进。

参考文献 References

- [1] Ye Yong(叶 勇), Wang Jinyan(王金彦). *Materials Review(材料导报)*[J], 2012, 26: 360
- [2] Li Liang(李 梁), Sun Jianke(孙健科), Meng Xiangjun(孟祥军). *Titanium Industry Progress(钛工业进展)*[J], 2004, 21(5): 19
- [3] You Zhenping(尤振平), Hui Songxiao(惠松骁), Ye Wenjun(叶文君) et al. *Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2012, 36(1): 31
- [4] Zhu Z S, Liu R Y, Yan M G et al. *Journal of Materials Science*[J], 1997, 32(19): 5163
- [5] Zhang Wangfeng(张旺峰), Wang Yuhui(王玉会), Li Yan(李艳) et al. *Rare Metal Materials And Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(7): 1239
- [6] Lei Jiang(雷 江), Ma Xiaojun(马小菊), Wei Beiling(尉北玲) et al. *Titanium Industry Progress(钛工业进展)*[J], 2012, 29(1): 36
- [7] Chen Yi(陈 逸), Li Jinshan(李金山), Sun Feng(孙 峰) et al. *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2012, 19(1): 35
- [8] Krishna K V M, Sahoo S K, Samajdar I et al. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2008, 383: 78
- [9] Murty K L, Indrajit Charit. *Progress in Nuclear Energy*[J], 2005, 48(4): 325
- [10] Peng Qian(彭 倩), Shen Baoluo(沈保罗). *Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2005, 29(6): 903
- [11] Allen V M, Preuss M, Robson J D et al. *Materials Science Forum*[J], 2005, 495-497(6): 675
- [12] Nagai N, Kakuma T, Miyamoto Y. *Journal of the Atomic Energy Society of Japan*[J], 1981, 23(4): 687
- [13] Yang Lei(杨 磊), Hui Songxiao(惠松骁), Ye Wenjun(叶文君) et al. *Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2011, 35(6): 928
- [14] Peng Jihua(彭继华), Li Wenfang(李文芳), Jean Luc Bechade et al. *Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2008, 32(1): 1
- [15] Fang Yongqiang(房永强), Jia Hong(贾 红), Zheng Xiaofei(郑晓斐) et al. *Silicon Valley(硅谷)*[J], 2013, 17: 92
- [16] Mao Weimin(毛卫民), Zhang Xinming(张新明). *Quantitative Texture Analysis of Crystalline Materials(晶体材料织构定量分析)*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1995:21
- [17] Zhang H, Sheng Z M, Zhang W F et al. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2015, 24: 2312

Distribution of Texture along Tube Wall Thickness of TA18 Alloy Tube

Sheng Zemin¹, Zhang Hui¹, Zhang Wangfeng², Wang Yuhui², Yan Mengqi²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

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

Abstract: The texture of the inner layer, middle layer and outer layer of cold rolled TA18 alloy tube were investigated and analyzed by X-ray diffraction technique. Contractile strain ratio (CSR), determined by the texture, which can reflect mechanical property anisotropy of a tube was also tested. The results show that texture intensity has a big gradient along the tube wall; through the peak value of orientation density from the orientation distribution function (ODF), the variation gradient is over 17%, and texture types are different greatly among the layers. The texture of the middle layer measured by the method of thinning and flattening, although it is high for this tube, its CSR is only 0.95, less than that of use standard 1.3. It is due to that the texture is not uniform along the tube wall, there exists favorable texture in radial direction and negative texture in tangential direction, and strong negative texture leads to deterioration of the mechanical property. Confirming the distribution of texture along the tube wall can provide reference for forecasting and improving mechanical properties of the tube, and supply foundation to optimize production process.

Key words: titanium alloy; texture; orientation distribution function (ODF); gradient

Corresponding author: Zhang Hui, Ph. D., Professor, Department of Material Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82626623, E-mail: zhanghui@mail.xjtu.edu.cn