

# TA18 钛合金管材织构对环向拉伸性能的影响

刘 凡<sup>1</sup>, 李 赟<sup>1</sup>, 王文睿<sup>1</sup>, 张 晖<sup>1</sup>, 张旺峰<sup>2</sup>, 王玉会<sup>2</sup>

(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:** 利用织构增强原理, 开发出了 TA18(Ti-3Al-2.5V) 钛合金 860 MPa 级高强度管材, 保证了管材的工艺性能, 同时又具有优异的力学服役性能。标准规定反映径向织构的管材收缩应变比(CSR)大于 1.3, 但对上限值未作规定。本研究设计出小管径的环向拉伸夹具, 测试了不同 CSR 管材的环向拉伸力学性能, 分析织构对环向抗拉强度的影响, 发现存在一个最有利的 CSR 值为 1.75, 大于或小于该 CSR 值时都会导致管材环向屈服强度下降。进一步测定了对应管材的极图和 ODF 图, 从微观结构上可以解释这一规律和本质。环向抗拉强度下降会引起液压系统工作时疲劳强度降低, CSR 值的上限在工艺设计时应当加以控制。本研究对发展安全可靠的航空液压系统具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

**关键词:** 钛合金; 收缩应变比; 织构; 环向拉伸; 施密特因子

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2020)06-2011-06

TA18(Ti-3Al-2.5V) 高强钛合金以其良好的室温、高温综合力学性能, 耐腐蚀性和优异的冷成型性, 成为航空航天管路系统的首选材料, 在先进飞机中作为油、气的输送管道材料, 被誉为飞机的“血管”<sup>[1-3]</sup>。但是 TA18 钛合金管材研制和加工技术难度大, 且加工后形成的织构对管材的工艺性能和服役性能有重要影响, 加之航空管材对性能和可靠性的要求越来越高, 因此, 深入进行 TA18 钛合金管材的研究和应用技术开发十分紧迫<sup>[4]</sup>。

六方晶系的钛合金, 其单晶体的<0002>方向强度最高。当控制轧制工艺获得的多晶织构<0002>方向与钛材某方向平行时, 材料该方向强度最高, 称为织构增强。对于 TA18 钛合金管材来说, 当织构<0002>晶向与钛合金管材径向大体一致时, 则管材壁厚方向强度增加, 切向强度降低, 变形时管材减径, 不减厚, 这会对管材的装配和服役十分有利。利用该原理, 已开发出了 TA18 钛合金 860 MPa 级高强度管材。此外, 对于高强薄壁 TA18 钛合金管材, 其综合力学性能提高的关键和首要因素是能够控制材料中的织构, 这就需要认识清楚织构与力学性能的关系, 才能保证制定出优化的钛合金管材制备工艺路线并获得稳定可靠的力学性能<sup>[5]</sup>。目前钛合金管材的评价标准主要针对轴向进行评价。由于管材内部存在强织构, 导致材料的各向异性, 因此管材轴向和环向的性能有较大区别。

管材环向性能更能够反映管材服役时的受力状态和承载能力, 而从轴向性能又难以推断环向力学性能<sup>[6,7]</sup>。从测量角度看, 由于薄壁管材横截面面积小, 材料少, 故存在试样夹持, 材料变形测量及标距确定等诸多困难。本研究设计出一种管材环向拉伸夹具, 测定管材的环向拉伸力学性能, 建立了一种可以研究管材环向性能的评价方法, 以获取管材全面的性能指标。

## 1 实 验

本实验采用的是 TA18 冷轧无缝钛合金管材。实验前, 对所有型号管材的尺寸(包括外径和壁厚)进行测量, 测量时在其一端相互垂直方向测量外径和四处壁厚, 分别取其算术平均值。 $D$  为管材平均外径值,  $T$  为管材平均壁厚值。管材的试样编号及规格见表 1。

### 1.1 织构测试

采用德国 Bruker 公司的 D8 Advance X 射线衍射仪对管材织构进行测试。将管材横剖得到轴向长度为 25 mm 的样品, 然后按硝酸:氢氟酸:水=1:1:8(体积比)的配比配成腐蚀液, 对样品进行壁厚腐蚀减薄, 减薄

表 1 不同型号的 TA18 管材外径和壁厚

Table 1 Outer diameter and wall thickness of TA18 tubing

Sample number	D6	D9	D13	D16	D19	D25
Outer diameter, $D$ /mm	6.21	9.39	12.63	15.84	19.02	25.30
Wall thickness, $T$ /mm	0.568	0.523	0.681	0.823	1.038	1.364

收稿日期: 2019-06-11

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(JZ20141106)

作者简介: 刘 凡, 女, 1992 年生, 硕士, 西安交通大学理学院, 陕西 西安 710049, 电话: 029-82626623, E-mail: 812843316@qq.com

至 0.05 mm 左右, 然后剪下 10 mm×10 mm 的薄片, 将该薄片展平后粘贴在载玻片上, 标明轴向(AD)与切向(TD), 测量  $\alpha$  相(10 $\bar{1}$ 0)、(0002)、(10 $\bar{1}$ 1)、(10 $\bar{1}$ 2)、(11 $\bar{2}$ 0) 5 个晶面的极图数据, 倾动角  $\chi$  的范围为 0°~70°, 转动角  $\varphi$  从 0°~360°, 步长 5°。经德国 Bruker 公司的 TexEval V2.5 软件计算出相应的极图和取向分布函数 ODF 图。

1.2 环向拉伸试样准备及力学性能测试

采用线切割从 6 种 TA18 管材成品上切取环宽为 3 mm 的试样, 室温环向拉伸试验在美国 INSTRON (A) 5985 电子万能材料试验机上进行。环向拉伸试样装载示意图如图 1 所示,  $H$  为支辊平面到与之平行的支辊轴向剖面间的距离,  $D_{grip}$  为拉力杆上支撑环形试样的柱头直径, 标距  $L_{r0}$  根据式 (1) 计算:

$$L_{r0} = \pi(D_{inner} - D_{grip})/2 \tag{1}$$

其中  $D_{inner}$  为管材内径。加载速率为 1.0 mm/min。拉伸过程自动描绘位移-载荷曲线。

1.3 收缩应变比 CSR

收缩应变比(CSR)是指成品管材在拉伸过程中周向真应变与径向真应变的比值。CSR 测试在拉伸力学试验机上进行, 由定义知:

$$CSR = \varepsilon_c / \varepsilon_r \tag{2}$$

其中,  $\varepsilon_c$  表示周向真实应变,  $\varepsilon_r$  表示径向真实应变。

周向真应变为:

$$\varepsilon_c = \ln(D/D_0) \tag{3}$$

其中,  $D$  为变形后直径,  $D_0$  为变形前直径。

轴向真应变为:

$$\varepsilon_a = \ln(L/L_0) \tag{4}$$

其中,  $L$  为变形后轴向长度,  $L_0$  为变形前轴向长度。

金属材料在达到应力极限点之前为均匀塑性变

形, 遵循变形前后体积近似不变的原理。根据体积不变原理可得径向真应变满足式 (5):

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_c - \varepsilon_a \tag{5}$$

将式(3)、(4)、(5)代入式(2)可得 CSR 值。CSR 用来表征管材抵抗壁厚减薄的能力, 对于评价和改进管材的加工性能十分重要。当 CSR 值为 1 时, 代表材料内部晶粒基轴取向是随机分布的。如果 CSR 值大于 1, 则说明管材内部大部分晶粒基轴沿着径向分布, 由于六方晶系中晶粒基轴方向为难变形方向, 因此管材壁厚方向进一步减薄的抗力较大。如果 CSR 值小于 1, 则表示管材内部晶粒基轴主要沿着周向分布, 管材管径方向进一步减小的抗力较大<sup>[8]</sup>。合格管材 CSR 一般不得小于 1.3。

2 结果与分析

2.1 环向拉伸力学性能

选取  $D_{grip}$  为 21.8 mm 的模块, 根据式 (1) 得到 D25 样品的标距为 5.6 mm。然后对试样 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>进行环向拉伸, 其中 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>试样均是从 D25 试样上线切割得到的环宽为 3 mm 的试样。图 2 和图 3 分别是 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>试样经环向拉伸后, 经过计算绘出的应力-应变曲线。图 2 中, 1<sup>#</sup>试样从  $A_1$ 、 $B_1$  点可以得到屈服强度  $R_{p0.2}$  和抗拉强度  $R_m$  分别为 779 和 861 MPa。图 3 中, 2<sup>#</sup>试样从  $A_2$ 、 $B_2$  点可以得到屈服强度和抗拉强度分别为 751 和 791 MPa, 取 2 次测试的平均值后, D25 的屈服强度和抗拉强度分别为 725 和 826 MPa。

不同管径的管材选取不同的  $D_{grip}$ 。依次计算出不同管径下的标距, 进而绘出不同型号管材的应力-应变曲线, 得出每个试样的环向拉伸的抗拉强度和屈服强度, 如表 2 所列。根据表 2 数据绘出 CSR 与环向拉伸的抗拉强度和屈服强度的关系, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, CSR 的大小对环向拉伸抗拉强

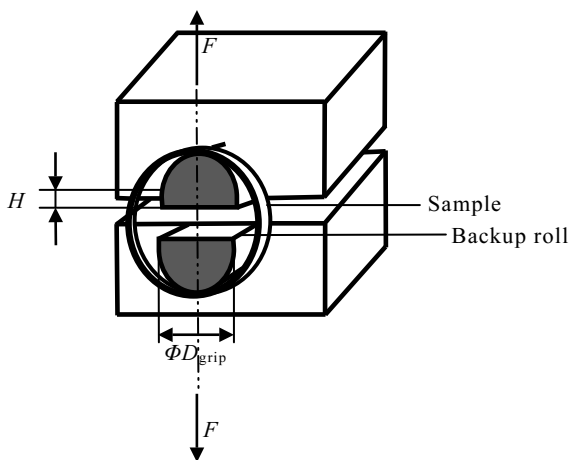


图 1 环向拉伸试样装载示意图

Fig.1 Schematic of the hoop tension sample loading

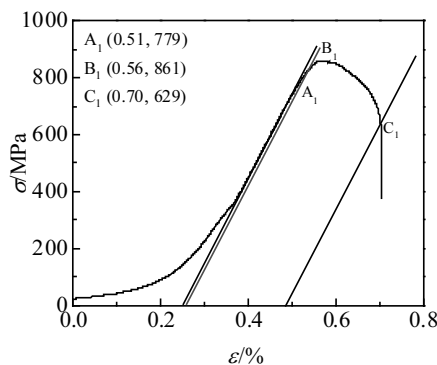


图 2 1<sup>#</sup>样品的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of sample 1<sup>#</sup> from D25

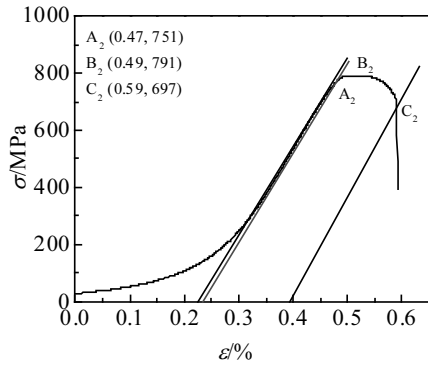


图 3 2#样品的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of sample 2# from D25

表 2 试样 CSR 与环向拉伸抗拉强度和屈服强度值  
Table 2 CSR and tensile strength and yield strength value of the sample in the hoop direction

Sample number	CSR	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$
D6	1.33	690	810
D9	2.30	667	788
D13	2.25	677	789
D16	1.57	686	822
D19	1.47	722	824
D25	1.75	765	826

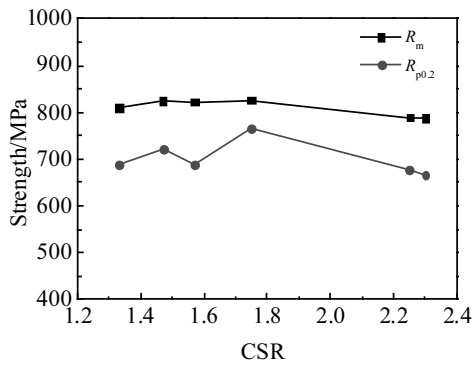


图 4 CSR 与环向抗拉强度和屈服强度的关系

Fig.4 Relationship among CSR with circumferential tensile strength and yield strength

度影响不大, 但是对环向屈服强度的影响明显, 随着 CSR 的增大, 环向屈服强度先增大后减小, 存在一个最高点为试样 D25, 该点 CSR 的值为 1.75, 环向屈服强度为 765 MPa。环向屈服强度最低点为试样 D9, 屈服强度为 667 MPa, 对应的 CSR 为 2.3。CSR 值是在生产过程中定量控制和表征密排六方晶系中钛合金管材结构的重要参数, 而且是最直接反映结构的参数<sup>[9,10]</sup>。因此 CSR 与环向力学性能的关系, 可以从结构对力学

性能的影响方面进行讨论。

### 2.2 织构

首先由于晶粒空间取向在三维空间中表达才会更加准确, 因此有必要引入一个可以定量表征晶粒在宏观样品坐标系中取向分布状态的函数, 即取向分布函数(简称 ODF)法<sup>[11]</sup>, 三维欧拉空间可以将传统的  $O-XYZ$  坐标系用三轴坐标表示出来, 而且在三维空间中任意一个取向都可以通过转动 3 个特定的角度  $\varphi_1, \varphi_2$  得到。通过测试计算得到 D6、D9、D13、D16、D19、D25 的 ODF 图。其中 ODF 峰值位于  $\varphi_2=0$  的截面内, D9 管材的 ODF 图如图 5 所示。

由 ODF 图得到织构极大值的欧拉角, 计算得到试样的织构组分, 如表 3 所示。

### 2.3 滑移系的施密特因子

施密特因子以其计算简单、表述方便的优点, 在金属塑性变形机制的分析中得到了广泛应用<sup>[12,13]</sup>。TA18 钛合金可近似看作  $\alpha$  钛合金, 具有六方密排晶体

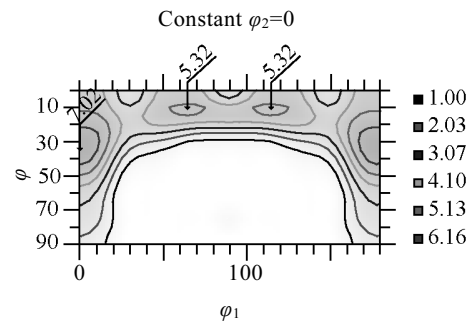


图 5 D9 管材的 ODF 图

Fig.5 ODF figure of D9

表 3 6 种不同管材的织构组分

Sample number	Euler angle/(°) ( $\varphi_1, \varphi_2$ )	Texture component	Included angle with (0002)/(°)	Contour level
D6	(0, 30.18, 0)	$(\bar{1}2\bar{1}5)[10\bar{1}0]$	32.43	6.65
	(60, 10.12, 0)	(0002)[ $1\bar{1}00$ ]	0	5.16
D9	(0, 34.85, 0)	$(\bar{1}2\bar{1}5)[10\bar{1}0]$	32.43	7.02
	(60, 4.94, 0)	(0002)[ $1\bar{1}00$ ]	0	5.32
D13	(0, 34.85, 0)	$(\bar{1}2\bar{1}5)[10\bar{1}0]$	32.43	6.41
	(65, 9.88, 0)	(0002)[ $1\bar{1}00$ ]	0	4.57
D16	(0, 40.06, 0)	$(\bar{1}2\bar{1}4)[10\bar{1}0]$	38.46	8.40
	(60, 0.27, 0)	(0002)[ $1\bar{1}00$ ]	0	4.46
D19	(0, 29.63, 0)	$(\bar{1}2\bar{1}6)[10\bar{1}0]$	27.90	6.64
	(60, 4.66, 0)	(0002)[ $1\bar{1}00$ ]	0	5.18
D25	(0, 35.12, 0)	$(\bar{1}2\bar{1}5)[10\bar{1}0]$	32.43	7.38
	(60, 9.60, 0)	(0002)[ $1\bar{1}00$ ]	0	4.82

结构。材料的晶体塑性本构关系是基于位错滑移、变形孪晶和晶格畸变产生。晶粒在冷轧的过程中发生塑性变形，由于位错滑移、孪生以及位向改变，导致形变织构产生。因此从孪生、滑移角度出发可对织构进行分析<sup>[14,15]</sup>。密排六方金属塑性变形过程中依赖于柱面(10 $\bar{1}$ 0)、锥面(10 $\bar{1}$ 1)和基面(0001) 3 个滑移面以及<11 $\bar{2}$ 0>滑移方向<sup>[16]</sup>，但 3 个滑移面与 1 个滑移方向构成的滑移系不足，使多晶材料不能均匀协调地变形，需要孪晶来协助变形，弥补滑移系的不足，使钛合金具有较好的塑性。因此，钛合金的变形过程中滑移和孪生同时存在。首先讨论滑移情况。在塑性变形过程中，基面滑移系 {0001}<11 $\bar{2}$ 0>，棱柱面滑移系 {10 $\bar{2}$ 0}<11 $\bar{2}$ 0>和棱锥面滑移系 {10 $\bar{1}$ 1}<11 $\bar{2}$ 0>均可启动。由于各滑移系之间临界剪切应力和施密特因子的不同，各滑移系的启动情况存在显著的差异。基面滑移有(0001)[ $\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 0]、(0001)[11 $\bar{2}$ 0]、(0001)[2 $\bar{1}$  $\bar{1}$ 0]等 3 个变体，棱柱面滑移系有(10 $\bar{1}$ 0)[ $\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 0]、(1 $\bar{1}$ 00)[11 $\bar{2}$ 0]、(01 $\bar{1}$ 0)[2 $\bar{1}$  $\bar{1}$ 0]等 3 个变体，棱锥面滑移系有(1 $\bar{1}$ 01)[11 $\bar{2}$ 0]、(10 $\bar{1}$ 1)[ $\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 0]、(01 $\bar{1}$ 1)[ $\bar{2}$ 110]以及( $\bar{1}$ 101)[ $\bar{1}$  $\bar{1}$ 20]、( $\bar{1}$ 011)[1 $\bar{2}$ 10]、(0 $\bar{1}$ 11)[2 $\bar{1}$  $\bar{1}$ 0]这 6 个变体。一般来说，施密特因子被用来预测变体的开动，最高施密特因子变体的分切应力最大，因此它会最先开动，则材料开始塑性变形，即达到屈服。为了解释织构对屈服强度的影响，这里采用一个简化模型，即把存在织构的材料假设为一个单晶材料，其与宏观试样坐标系的方位等于织构和该试样坐标系的相对方位，从而通过计算施密特因子，判断滑移和孪生的难易。当把织构简化为一个单晶时，织构极值点的欧拉角为单晶取向，计算晶粒在这一欧拉角下的施密特因子，比较轴向、环向加载受力下的基面滑移系、棱柱面滑移系和棱锥面滑移系对应的施密特因子，从而可以获得屈服强度与织构的关系。

首先利用式(6)和(7)分别计算力轴为管材轴向、切向在欧拉角为( $\varphi_1, \varphi, \varphi_2$ )的晶体坐标系中的表达。

$$\begin{bmatrix} u_a \\ v_a \\ t_a \\ w_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ -1/\sqrt{3} & -1/3 & 0 \\ 0 & 0 & a/c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \varphi \\ -\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi \\ \sin \varphi_1 \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} u_t \\ v_t \\ t_t \\ w_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ -1/\sqrt{3} & -1/3 & 0 \\ 0 & 0 & a/c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \varphi \\ -\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi \\ -\cos \varphi_1 \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

接下来利用晶向与晶向之间的夹角计算转化为晶面与晶面间夹角计算，运用六方晶系的晶面夹角公式(8)，可计算出施密特因子值。

$$\cos \theta = \frac{[h_1 h_2 + (h_1 k_2 + h_2 k_1)/2 + k_1 k_2]4/3a^2 + l_1 l_2 / c^2}{[(h_1^2 + h_1 k_1 + k_1^2)4/3a^2 + l_1^2 / c^2]^{1/2} [(h_2^2 + h_2 k_2 + k_2^2)4/3a^2 + l_2^2 / c^2]^{1/2}} \quad (8)$$

结合式(6)、(7)和(8)可以计算出不同管材轴向、环向的基面滑移系、棱柱面滑移系及棱锥面滑移系的施密特因子。通过计算出的不同滑移系下的施密特因子，发现对于轴向拉伸而言，6 种不同型号的管材的施密特因子最大值均为 0.433，为棱柱面滑移。但是，对于环向拉伸而言，在不同的滑移系下，基面滑移系有最大值。D6 的施密特因子最大值为 0.437，同理依次计算不同滑移系下 D9、D13、D16、D19、D25 的最大施密特因子为 0.468、0.468、0.492、0.429、0.468，此时滑移系的施密特因子与屈服强度的关系并不明显，如图 6 所示。

### 2.4 孪生的施密特因子

由于钛合金滑移系少，因此滑移变形少，塑性变形的过程必然包括孪生变形。孪生所需的临界切应力比滑移所需的高，但由于施密特因子对位向的依赖性，某些位向的晶粒在滑移前就激活了孪生<sup>[17]</sup>。故从孪生角度出发，计算不同型号的管材主要孪生系 {10 $\bar{1}$ 2}< $\bar{1}$ 011>的施密特因子值。表 4 列出了 D6 孪生系 {10 $\bar{1}$ 2}< $\bar{1}$ 011>在不同孪生体下的施密特因子值，其最大值为 0.186。

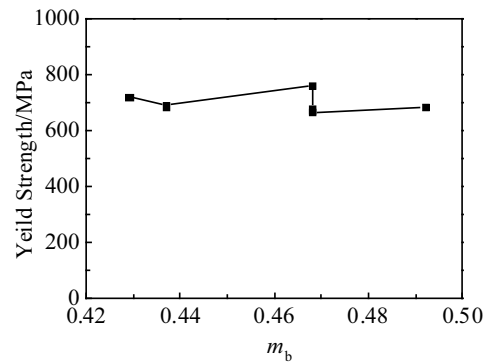


图 6 滑移系最大施密特因子与屈服强度的关系

Fig.6 Relationship between maximum Schmid factor of slip system and yield strength

表 4 D6 孪生系 {10 $\bar{1}$ 2}< $\bar{1}$ 011>的施密特因子  
Table 4 Schmid factor of twinning system of D6

Twinn	Schmid factor
(10 $\bar{1}$ 2)[ $\bar{1}$ 011]	0.127
(01 $\bar{1}$ 2)[0 $\bar{1}$ 11]	0.117
( $\bar{1}$ 102)[1 $\bar{1}$ 01]	0.117
( $\bar{1}$ 012)[10 $\bar{1}$ 1]	0.127
(0 $\bar{1}$ 12)[01 $\bar{1}$ 1]	0.186
(1 $\bar{1}$ 02)[ $\bar{1}$ 101]	0.186

同理, 依次计算出 D9、D13、D16、D19、D25 的  $\{10\bar{1}2\}<\bar{1}011>$  不同孪生体下的孪生施密特因子, 最大值依次为 0.161、0.161、0.205、0.197、0.161。绘出不同型号的管材的最大孪生施密特因子与屈服强度的关系, 如图 7 所示。

从图 7 来看, 随着施密特因子的增大, 屈服强度逐渐降低。孪生施密特因子最小为 0.161, 屈服强度最大为 765 MPa。屈服强度越大, 材料抵抗塑性变形的能力越大。与 a 相比, b 和 c 的屈服强度低。可能是由于该孪生系的存在使新的滑移系开始启动, 从而塑性变形能继续发生, 屈服强度降低。一般来说, 径向织构越强, 管材的 CSR 值也会越高, 晶粒沿径向的取向多, 管材性能优势越显著。但结合图 4 来看, 并不是 CSR 越大越好。TA18 管材在塑性变形时, 同样会产生孪生系, 使 CSR 在 1.75 时的屈服强度最高。因此, CSR 值的上限在工艺设计时应当加以控制。

### 2.5 环向和轴向力学性能比较

表 5 为 6 种管材的轴向和环向位伸的抗拉强度。由表 5 可以看出, 同一型号的 TA18 钛合金管材的轴向拉伸和环向拉伸抗拉强度是有差别的。差值最大的试样为 D6, 轴向拉伸的抗拉强度为 966 MPa, 环向拉

伸的抗拉强度为 810 MPa, 轴向比环向抗拉强度高 19.3%。通过分析环向和轴向拉伸下滑移系的施密特因子, 发现环向拉伸比轴向拉伸开动的滑移系多, 变形协调性好, 所以塑性高, 屈服强度低。故环向抗拉强度低于轴向抗拉强度, 不能由管材的轴向性能完全代替环向性能。

### 3 结 论

1) 通过测试不同 CSR 管材的环向拉伸的抗拉强度, 发现存在一个最有利的 CSR 值为 1.75, 大于或小于该 CSR 值时都会导致管材环向拉伸抗热强度下降。

2) 轴向拉伸启动的滑移系是棱柱面滑移系, 环向拉伸启动的滑移系是基面滑移系。从施密特因子对滑移的影响不能解释钛合金管材结构引起屈服强度的变化, 而孪生的施密特因子与管材屈服有对应关系。

3) 对于同一管材而言, 环向拉伸的抗拉强度低于轴向拉伸, 因此并不能完全使用轴向拉伸性能(如抗拉强度)代替环向拉伸性能。

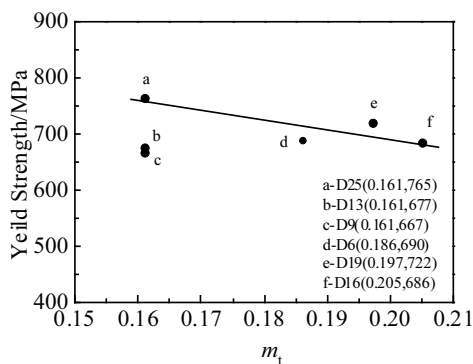


图 7 孪生系最大施密特因子与屈服强度的关系

Fig.7 Relationship between maximum Schmid factor of twinning system and yield strength

表 5 6 种管材的轴向和环向拉伸的抗拉强度

Table 5 Axial tensile strength and circumferential tensile strength of six tubing

Sample number	Axial tensile strength/MPa	Circumferential tensile strength/MPa
D6	966	810
D9	933	788
D13	922	789
D16	946	822
D19	963	824
D25	943	826

### 参考文献 References

[1] Yang Jianchao(杨建朝), Xi Jinhui(席锦会), Yang Yashe(杨亚社) et al. *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2014, 31(4): 6

[2] Jiang Zhiqiang(江志强), Yang He(杨 合) Zhan Mei(詹 梅) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2009, 16(4): 44

[3] Adib A M L, Baptista C A R P, Barboza M J R et al. *Engineering Failure Analysis*[J], 2007, 14(8): 1605

[4] Yu Zhiyuan(余志远), Yu Zhentao(于振涛), Liu Hanyuan(刘汉源) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2018, 47(9): 6

[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] Zhang Changyi(张长义), Ning Guangsheng(宁广胜), Tong Zhenfeng(佟振峰) et al. *Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术)[J], 2005, 39(S): 34

[7] Murty K L, Charit I. *Progress in Nuclear Energy*[J], 2006, 48(4): 325

[8] Fang Yongqiang(房永强), Jia Hong(贾 红), Zheng Xiaofei(郑晓斐). *Silicon Valley*(硅谷)[J], 2013, 17: 92

[9] 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

[10] Li Zhixin, Zhang Mei, Guo Kun et al. *Rare Metal Materials*

- and Engineering* [J], 2017, 46(11): 3169
- [11] Zhang H, Sheng Z M, Zhang W F *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2015, 24(6): 2312
- [12] Zhang Shihong(张士宏), Song Guangsheng(宋广胜), Xu Yong(徐勇) *et al. Journal of Netshape Forming Engineering* (精密成形工程)[J], 2014, 6(6): 1
- [13] Bridier F, Villechaise P, Mendez J. *Acta Materialia*[J], 2008, 56(15): 3951
- [14] Im Y D, Lee Y K, Song K H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 725: 479
- [15] Wang Y N, Huang J C. *Materials Chemistry and Physics*[J], 2003, 81(1): 11
- [16] Xiao Lin(肖林). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1995, 24(6): 22
- [17] Peng Qian(彭倩), Shen Baoluo(沈保罗). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2005, 29(6): 903

## Effect of Texture on Circumferential Tensile Properties of TA18 Titanium Alloy Tubing

Liu Fan<sup>1</sup>, Li Yun<sup>1</sup>, Wang Wenrui<sup>1</sup>, Zhang Hui<sup>1</sup>, Zhang Wangfeng<sup>2</sup>, Wang Yuhui<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** Taking advantage of texture strengthening, the TA18(Ti-3Al-2.5V) titanium alloy tubing with tensile strength of 860 MPa as well as a good combination of mechanical properties and high formability was developed. While the contractile strain ratio (CSR) of such tubing must be greater than 1.3 to meet the current standard, the upper limit value is not specified. In this paper, a fixture was designed for the hoop tension of tubing with a small diameter, and the mechanical properties in the hoop direction of tubing with different CSR values was tested. The effects of texture on the circumferential strength was analyzed. Results show that the optimal CSR value for the yield strength is 1.75, while a higher or lower value would lead to a decrease of the strength. Additionally, based on the pole figures and the orientation distribution function (ODF), the essence of the above regulation is well explained from microscopic aspects. Lower circumferential strength of hydraulic tubing will result in poorer fatigue life of hydraulic system in service; hence the upper limit value, not just the lower limit value, of CSR should be controlled. This investigation will be of theoretical significance and application value for the development of safe and reliable aerospace hydraulic systems.

**Key words:** titanium alloy; contractile strain ratio; texture; the hoop tension; Schmid factor

---

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