

变形量对 TC18 钛合金力学性能的影响

Influence of Deforming Amount on Mechanical Properties of TC18 Alloy

沙爱学,李兴无,王庆如

(北京航空材料研究院,北京 100095)

SHA Ai-xue, LI Xing-wu, WANG Qing-ru

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

摘要: 采用一种专门用于钛合金锻造工艺参数定量研究的专利技术研究了 β 区变形量(从 10% 到 65%)对 TC18 钛合金关键力学性能、显微组织的影响。研究结果表明: β 区变形时,变形量对合金抗拉强度影响不大, σ_b 在 1150MPa 左右;但对合金伸长率、断面收缩率和断裂韧性均有显著影响。变形量每增加 10%, 伸长率可提高 0.7% 左右;断面收缩率提高 4% 左右;断裂韧性下降 $3\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 左右。为获得 TC18 钛合金强度-塑性-韧性的最佳匹配,应将 β 区变形量控制在 35% 左右。

关键词: TC18 钛合金; β 锻造; 变形量; 力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.11.006

中图分类号: TG146.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)11-0034-04

Abstract: The influence of β zone deforming amount (changing from 10% to 65%) on microstructure and key mechanical properties of TC18(Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe) alloy has been studied by using a patent technology, specially for the quantitative study of titanium alloy forging process parameters. The results show that when β zone deforms, the deforming amount has little effect on the tensile strength, and σ_b is at around 1150MPa; but has obvious influence on the elongation rate, ductility and fracture toughness. When forging in beta field, the deforming amount is increased every 10%, the elongation rate is increased about 0.7%, fracture shrinkage is increased about 4%, fracture toughness is reduced about $3\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. In order to achieve the optimum match for TC 18 titanium alloy strength, plasticity and toughness, β zone deforming amount should be controlled around 35%.

Key words: TC18 titanium alloy; beta forging; deforming amount; mechanical property

TC18 钛合金名称成分是 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe,按名称成分计算的 Mo 当量为 12.8,是典型的近 β 型钛合金。该合金具有良好的热加工性、焊接性、淬透性和可热处理强化性^[1-4]。TC18 钛合金退火后的强度与 TC4、TC6 等钛合金固溶时效状态下的强度相当,在 1080MPa 以上,是退火状态下强度最高的钛合金^[5]。TC18 钛合金在国内外多个型号的飞机上获得广泛应用,被用于制造机身、起落架等部位的大型重要承力构件,满足了先进航空飞行器对结构减重的迫切需要。

影响 TC18 钛合金(模)锻件力学性能和显微组织的锻造工艺参数主要包括锻造前加热温度、保温时间、变形量、应变速率等^[6-11]。文献[12-14]中详细介绍了加热温度、保温时间等工艺参数对 TC18 钛合金力学性能和显微组织的影响,但关于变形量与该合金力学性能关系的研究还鲜见报导,其中的一个重要原因

是采用传统锻饼实验获得的锻件低倍组织不均匀、性能数据分散性大,很难建立变形量与锻件力学性能的定量关系。本工作采用一种专门用于钛合金锻造工艺参数定量研究的专利技术^[15],较为系统地研究了(区)变形量对 TC18 钛合金显微组织和关键力学性能的影响,建立了变形量与 TC18 钛合金关键力学性能的定量关系,研究结果对制定 TC18 钛合金大型模锻件生产工艺具有重要的指导意义。

1 实验材料及方法

原材料为 TC18 钛合金 $\phi 170\text{mm}$ 棒材,炉号为 548-20070088,棒材显微组织如图 1 所示,为典型的等轴组织。原材料化学成分(质量分数/%):Al 5.5, Mo 5.18, V 4.95, Cr 0.98, Fe 0.98, C 0.01, N 0.0046, H 0.0039, O 0.1,其余为 Ti,相变点 $T_\beta =$

880℃。将改锻后的坯料放在具有专利技术的专用模具内一次成形获得 3 个变形量,分别为 10%,35%和 65%。模锻前加热温度为 $T_{\beta}+25^{\circ}\text{C}$,锻后按统一的双重退火制度对模锻件进行热处理:825℃,2h,炉冷至 750℃,2h,AC+620℃,4h,AC。热处理后从锻件上切取坯料并加工成 $d_0=5\text{mm}$, $L_0=25\text{mm}$ 的标准拉伸试样。拉伸实验在 Instron-4507 型万能实验机上进行,屈服前应变速率为 $0.00025\sim0.0025\text{s}^{-1}$,测定试样的 σ_b , $\sigma_{0.2}$, δ_5 和 ψ 。对拉断试样螺纹根部(未变形区)进行显微组织 SEM 相分析,取样方向为横向。SEM 相分析在 JSM-5800 型扫描电镜上进行。

2 实验结果及分析

表 1 给出了不同变形量下 TC18 钛合金模锻件主要力学性能测试结果。由表可见,变形量对合金强度影响不大,主要是影响合金塑性和断裂韧度。变形量与 TC18 钛合金伸长率、断面收缩率和断裂韧度的对

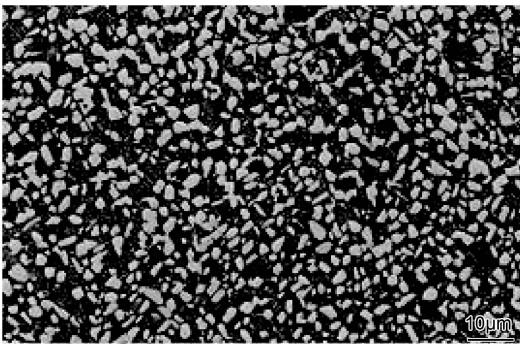


图 1 TC18 钛合金 ϕ170mm 棒材显微组织
Fig. 1 Microstructure of TC18 alloy bar of ϕ170mm

应关系见图 2。由图 2 可见,在选定的实验温度下,变形量与伸长率、断面收缩率和断裂韧度均呈良好的线性关系:变形量 ϵ 每增加 10%,伸长率提高 0.7%左右;断面收缩率提高 4%左右;断裂韧度下降 $3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 左右,通过控制变形量可以在较宽的范围内调整 TC18 钛合金的塑性和韧性。

表 1 不同变形量下 TC18 钛合金锻件主要力学性能

Table 1 Mechanical properties of TC18 alloy under different deforming amount

Deformation amount/ %	Specimen orientation		Tensile property				Fracture toughness	
			σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$	$K_{IC}(\text{T-L orientation})/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	
10	Longitudinal	Individual	1122	1074	12.8	23.2	96.61	
			1148	1103	12.6	20.8	99.51	
			1169	1121	9.7	24.0	92.73	
		Mean	1146	1099	11.7	22.7	96.28	
35	Longitudinal	Individual	1169	1094	14.3	36.9	90.28	
			1152	1085	15.6	36.5	93.54	
			1145	1087	13.3	32.9	87.40	
		Mean	1155	1089	14.4	35.4	90.41	
65	Longitudinal	Individual	1137	1091	17.8	52.7	80.36	
			1159	1099	14.9	42.3	82.56	
			1130	1082	13.8	37.1	—	
		Mean	1142	1091	15.5	44.0	81.46	

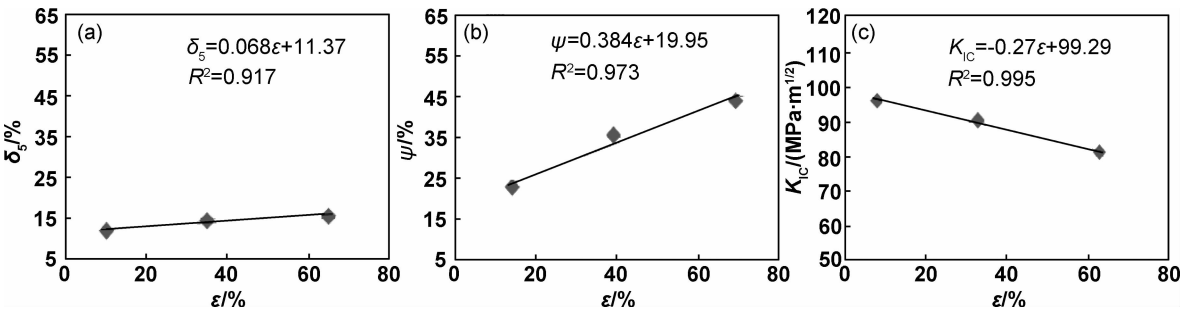


图 2 TC18 钛合金 β 区变形量与关键力学性能的对对应关系 (a)ε 和 δ_5 之间关系;(b)ε 和 ψ 之间关系;(c)ε 和 K_{IC} 之间关系
Fig. 2 Mechanical properties of TC18 alloy under different deforming amount when forged in β field
(a)relationship between ϵ and δ_5 ;(b)relationship between ϵ and ψ ;(c)relationship between ϵ and K_{IC}

图 3 给出了三种典型变形量下的显微组织照片。由图 3(a)可见,由于变形量小,属临界变形量范

围,显微组织中保留了较多的晶界平直 α 相,对应合金塑性偏低;由图 3(b)可见,变形量达到 35%时,原

始 β 晶粒得到了充分破碎,晶界 α 相变得曲折断续,此时合金塑性与断裂韧性匹配较好;由图 3(c)可见,变形量达到 65% 时,原始 β 晶粒沿变形方向被明显拉长,部分原始 β 晶粒发生了再结晶,不难预见这种

组织有良好的塑性。由图 2 还可以看出,变形量主要影响原始 β 晶粒尺寸和晶界 α 相形态,对晶内 α 相形态影响不大。由于是单相区变形,晶内 α 相均呈短片状。

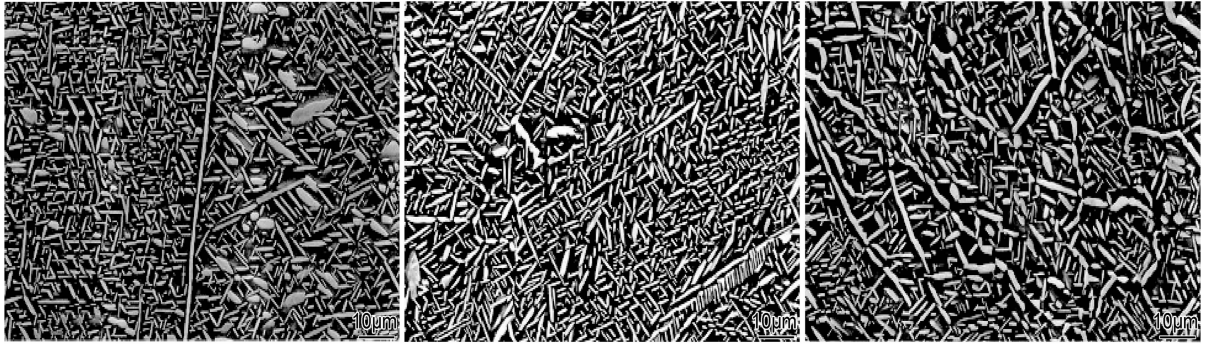


图 3 TC18 钛合金不同 β 区变形量下的显微组织 (a) $\epsilon=10\%$; (b) $\epsilon=35\%$; (c) $\epsilon=65\%$

Fig. 3 Microstructures of TC18 alloy under different deforming amount when forged in β field (a) $\epsilon=10\%$; (b) $\epsilon=35\%$; (c) $\epsilon=65\%$

3 讨论

以往研究钛合金锻造工艺参数的实验方法主要有 3 种: (1) 热模拟实验 热模拟是研究各类金属在不同变形条件下应力-应变行为的基础实验方法。通过设定不同的加热温度、应变速率、变形量等工艺参数,可获得金属在拉伸或压缩过程中的应力-应变曲线。但由于热模拟试样尺寸小,热模拟后通常只能进行显微组织和硬度分析,无法切取拉伸、冲击、断裂等力学性能试样,因此不能有效建立起“工艺-组织-性能”三者对应关系。(2) 锻饼实验 锻饼实验是最常用的研究锻造参数与锻件力学性能关系的实验方法。在对新合金进行锻造工艺研究或对已有合金进行工艺优化时,通常采用该方法。锻饼实验方法的要点是:先切取同样大小的实验坯料,然后按不同的工艺对坯料进行锻粗变形,通过从饼坯上切取力学性能试样建立起“工艺-组织-性能”对应关系。但锻粗变形存在明显的区域不均匀性,在饼坯截面上同时存在变形死区、大变形区及自由变形区,不同区域上组织性能都有很大差异。取样位置不当很容易造成力学性能实验结果分散性大,严重时甚至会误导模锻工艺制定。(3) 模锻实验 该方法是直接采用现成的模具来研究锻造工艺参数对锻件性能的影响。这种方法得到的实验结果能够代表合金在不同锻造工艺下的真实性能水平,但由于飞机上的锻件多为高筋薄壁结构形式,变形量很难精确计算,因此无法定量研究变形量对锻件力学性能的影响。

本工作采用新的实验方法研究了模锻变形量在 10%~65% 范围内变化时 TC18 钛合金力学性能的变化规律,获得了规律性很强的研究结果。从研究结果

看,合金强度随变形量变化不大,均在 1150MPa 左右,因此想通过增加模锻变形量来提高合金强度是比较困难的。这可能是因为对于 TC18 钛合金而言,其抗拉强度主要通过热处理过程中从亚稳定 β 相中析出细小弥散的次生 α 相来保证,前期研究结果表明,第二级退火每降低 10°C ,TC18 钛合金抗拉强度可提高 20MPa 左右。

模锻变形量对合金的塑性和断裂韧性有显著影响,但二者随变形量的变化规律是相反的。要想提高合金的伸长率和断面收缩率应尽量增加模锻时的变形量,使原始 β 晶粒得到充分破碎,晶界 α 相曲折断续分布;要想提高合金的断裂韧性应尽量减少模锻时的变形量,保留较多的晶界平直 α 相,增加裂纹在基体中扩展时路径的曲折程度。要想获得塑性与断裂韧性的合理匹配,将模锻时单相区变形量控制在 35% 左右是比较合理的,此时 TC18 钛合金抗拉强度 σ_b 可达到 1155MPa,伸长率 δ_5 可达到 14.4%,断面收缩率 ψ 可达到 35.4%,断裂韧性 K_{IC} (T-L 向) 可达到 $90.41\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

4 结论

(1) 模锻时 β 区变形量对 TC18 钛合金抗拉强度影响不大,但对塑性和韧性指标有显著影响。

(2) 变形量每增加 10%,伸长率可提高 0.7% 左右,断面收缩率提高 4% 左右,断裂韧性下降 $3\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 左右。

参考文献

[1] FANNING J C, BOYER R R. Properties of TIMETAL 555-a

- new near-beta titanium alloy for airframe components [A]. Ti-2003 Science and Technology [M]. Hamburg: DGM, 2004. 2643—2649.
- [2] FROES F H, BOMBERGER H B. The beta titanium alloy[J]. Metals, 1985, (7): 28—37.
- [3] KUBIAK K, HADASIK E, SIENIAWSKI J, et al. Influence of microstructure on hot plasticity of Ti-6Al-4V and Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloys [A]. Ti-2003 Science and Technology [C]. Hamburg: DGM, 2004. 371—376.
- [4] POLKIN S, RODIONOV V L, STROSHKOV A N, et al. Structure and mechanical properties of VT22($\alpha+\beta$) high strength titanium alloy semiproducts [A]. Titanium '92 [M]. San Diego: TMS, 1992. 1569—1572.
- [5] 王金友, 葛志明, 周彦邦. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 106.
WANG Jin-you, GE Zhi-ming, ZHOU Yan-bang. Titanium Alloys for Aeronautic [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985. 106.
- [6] 盛险峰, 丁志文, 朱益藩. 变形及热处理工艺对 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 1999, 35 (Suppl 1): S465—S468.
SHENG Xian-feng, DING Zhi-wen, ZHU Yi-fan. The effects of deformation and heat treatment on the microstructure and properties of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35 (Suppl 1): S465—S468.
- [7] 王新平, 孟祥军, 刘茵琪. 热变形参数对亚稳定 β 型钛合金组织和性能的影响[J]. 金属学报, 1999, 35 (Suppl 1): S456—S459.
WANG Xin-ping, MENG Xiang-jun, LIU Yin-qi. The effects of heat-deformation parameters on the microstructure and properties of beta titanium alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35 (Suppl 1): S456—S459.
- [8] 朱知寿, 王庆如, 郑永灵, 等. 损伤容限型钛合金新型 β 锻造工艺[J]. 中国有色金属有色学报, 2004, 14 (Suppl 3): 13—16.
ZHU Zhi-shou, WANG Qing-ru, ZHENG Yong-ling, et al. A new β forging processing for damage tolerance titanium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14 (Suppl 3): 13—16.
- [9] 张庆玲, 李兴无, 储俊鹏, 等. 变形温度对 TA15 合金组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38 (Suppl 1): S161—S163.
ZHANG Qing-ling, LI Xing-wu, CHU Jun-peng, et al. The effect of upset deformation temperature on microstructure of TA15 alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38 (Suppl 1): S161—S163.
- [10] 徐锋, 黄爱军, 李阁平, 等. 热工艺对 TC6 钛合金显微组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38 (Suppl 1): S174—S177.
XU Feng, HUANG Ai-jun, LI Ge-ping, et al. Effect of heat treatment on microstructure of TC6 alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38 (Suppl 1): 174—177.
- [11] 姚泽坤, 郭鸿镇, 杨陈, 等. 热力参数对 Ti-17 合金等温锻件显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2002, 38 (Suppl 1): S164—S167.
YAO Ze-kun, GUO Hong-zhen, YANG Chen, et al. The effects of thermodynamic parameters on microstructure and mechanical properties of Ti-17 alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38 (Suppl 1): S164—S167.
- [12] 沙爱学, 李兴无, 王庆如. 热变形温度对 TC18 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15 (8): 1167—1171.
SHA Ai-xue, LI Xing-wu, WANG Qing-ru. Influence of hot deformation temperature on microstructure and mechanical properties of TC18 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15 (8): 1167—1171.
- [13] 沙爱学, 李兴无, 曾卫东, 等. 钛合金 β 区加热保温时间的研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30 (4): 8—11.
SHA Ai-xue, LI Xing-wu, ZENG Wei-dong, et al. Study on holding time of β zone heating of titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30 (4): 8—11.
- [14] 李红恩, 沙爱学. TC18 钛合金热压参数对流动应力与显微组织的影响[J]. 材料工程, 2010, (1): 85—88.
LI Hong-en, SHA Ai-xue. Effects of hot process parameters on flow stress and microstructures of TC18 titanium alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2010, (1): 85—88.
- [15] 沙爱学, 李兴无, 王庆如, 等. 一种钛合金锻造工艺参数的实验方法[P]. 中国专利: ZL200810097522.2, 2008-5-12
SHA Ai-xue, LI Xing-wu, WANG Qing-ru, et al. A testing method for forging process of titanium alloys [P]. China Patent: ZL200810097522.2, 2008-5-12.

收稿日期: 2012-10-18; 修订日期: 2014-07-15

作者简介: 沙爱学 (1973—), 女, 研究员, 博士, 主要从事钛合金相关领域的科研工作, 联系地址: 北京 81 信箱 15 分箱 (100095), E-mail: aixue.sha@biam.ac.cn