

# TC4-DT 钛合金自由锻件组织与性能的影响因素

童路<sup>1</sup>, 朱知寿<sup>1</sup>, 俞汉清<sup>2</sup>, 王之录<sup>3</sup>

- (1. 北京航空材料研究院, 北京 100095;  
(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;  
(3. 景德镇航空锻铸集团公司, 景德镇 333039)

**摘要:** 研究不同尺寸规格和质量的 TC4-DT 钛合金自由锻件的组织与性能的影响因素。结果表明: 为获得具有均匀组织和性能的 TC4-DT 钛合金自由锻件, 应尽量避免采用单火次、大变形的锻造方式。在制定合适的锻后热处理制度时, 应综合考虑锻件的最大截面和尺寸因素。

**关键词:** TC4-DT 钛合金; 自由锻件; 组织; 性能; 均匀性

中图分类号: TF 804.3

文献标志码: A

## Influence factors of microstructure and property of TC4-DT titanium alloy free forgings

TONG Lu<sup>1</sup>, ZHU Zhi-shou<sup>1</sup>, YU Han-qing<sup>2</sup>, WANG Zhi-lu<sup>3</sup>

- (1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;  
(2. Stated Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
(3. Jinghang Forging & Casting Co., Ltd., Jingdezhen 333039, China)

**Abstract:** The influence factors of microstructure and property uniformity of TC4-DT titanium alloy free forgings with different sizes and mass were studied. The results show that a TC4-DT titanium alloy free forging with uniform microstructure and property will be achieved by a multi-step forging process with different smaller deformation rates instead of single-step process with a larger deformation rate. The factors of maximum thickness of cross section and mass of forgings should also be taken into account when a proper heat-treatment processing is used.

**Key words:** TC4-DT titanium alloy; free forging; microstructure; property; uniformity

TC4-DT 中强高损伤容限型钛合金是我国新一代飞机的关键主干材料, 具有很高的断裂韧性和抗疲劳裂纹扩展能力, 特别适合于制造安全寿命级关键承力部件。

锻件组织性能的均匀性主要由锻件的高倍组织、低倍组织、力学性能、无损探伤等检测来表现。在生产过程中, 影响自由锻件组织与性能均匀性的因素有很多, 如原材料、改锻及制坯工艺、锻造成形工艺、热处理制度以及锻件的尺寸、质量、形状等因素<sup>[1-3]</sup>。

本文作者主要通过针对 TC4-DT 钛合金自由锻件

的高、低倍组织及力学性能, 重点分析改锻工艺和锻件尺寸对组织与性能均匀性的影响。

## 1 实验

### 1.1 试验材料

试验材料采用西部超导公司加工生产的  $d210$  mm 规格 TC4-DT 钛合金大棒材, 主要化学成分为 6.32%Al, 4.40%V, <0.15%Fe, 0.03%C, <0.03%N,

0.0064% $H$ , 0.07% $O$ , <0.10% $Si$ ,  $Ti$ 基。采用淬火金相法进行棒材相变点的测试, 结果为 964。对棒材的高、低倍组织进行评级, 其结果如图 1 所示。

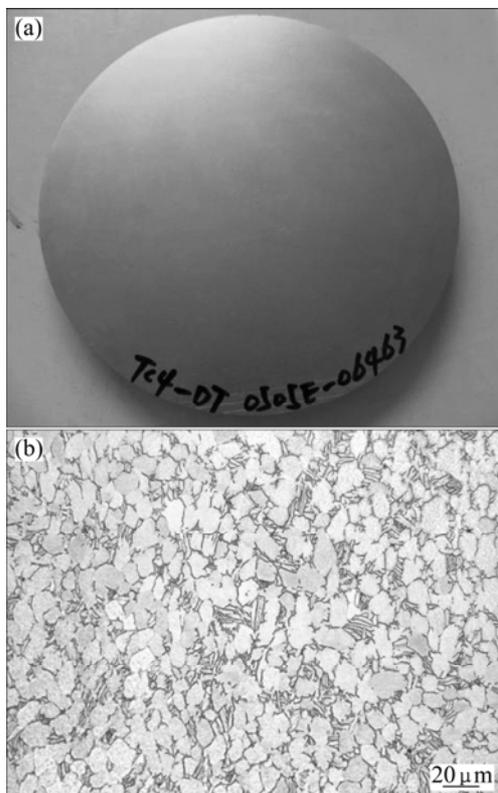


图 1 TC4-DT 钛合金  $d210$  mm 棒材的组织

Fig.1 Macrostructure (a) and microstructure (b) of  $d210$  mm TC4-DT alloy bar

从图 1 可知,  $d210$  mm 规格棒材的低倍组织为典型的模糊晶, 表明低倍组织细小、均匀。高倍显微组织为双态组织, 初生  $\alpha$  呈等轴化或短棒状态。

## 1.2 试验内容

从原材料的高、低倍组织的入厂复验结果来看, 该炉批的棒材金相组织较好, 可直接投入锻件生产。在景航公司 3t 自由锻锤上, 采用  $T_{\beta}-35$  (929) 常规自由锻造工艺, 其中锻件 1 经 1 火次完成锻造, 尺寸由  $d210$  mm $\times$ 192 mm 锻至 344 mm $\times$ 148 mm $\times$ 135 mm, 锻造变形量为 79%; 锻件 2 经 4 火次完成锻造, 尺寸由  $d210$  mm $\times$ 791 mm 锻至 530 mm $\times$ 390 mm $\times$ 130 mm。锻后均采用空冷制度, 锻件最终形状如图 2 所示。

锻后热处理采用“准  $\beta$  热处理 + (730, 2 h, 空冷)”的热处理工艺。虽然两自由锻件体积差别明显, 但其最大截面厚度相当(锻件 1 为 135 mm, 锻件 2 为

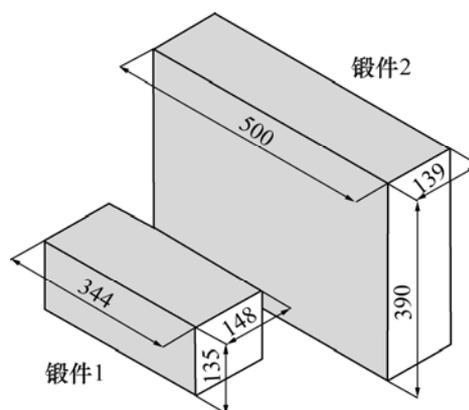


图 2 锻件 1 和锻件 2 的外形轮廓尺寸图(mm)

Fig.2 Overall dimensions of forgings 1 and 2 (mm)

130 mm), 故具体准  $\beta$  热处理工艺均采用  $T_{\beta}+(15, 35$  min, 空冷)。两锻件在同一电炉中同时进行热处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 改锻工艺对自由锻件组织与性能均匀性的影响

由锻件的宏观组织(如图 3)可以看出, 锻件 1 的低倍组织局部有清晰晶, 晶粒较粗大, 锻件的组织均匀性较差; 而锻件 2 的低倍组织呈现出均匀的模糊晶和半清晰晶, 锻件的组织均匀性较好。

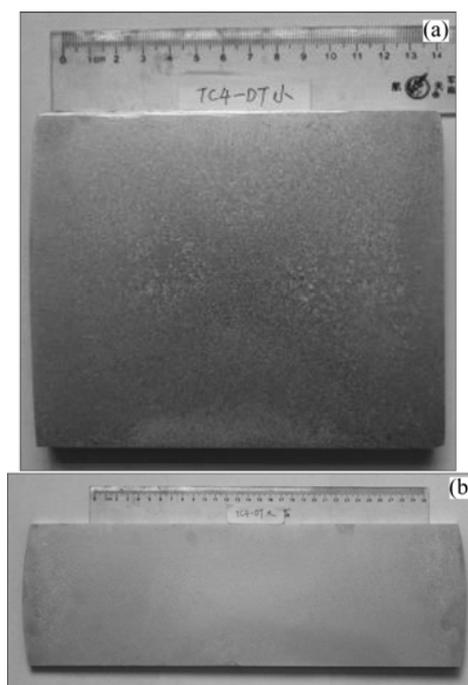


图 3 锻件 1 及锻件 2 的宏观组织

Fig.3 Macrostructures of Forging 1 (a) and Forging 2 (b)

由工艺可知, 锻件 1 经 1 火次完成锻造, 锻造变形量达到 79%, 锻件在两相区经多道次压缩变形, 不同区域变形程度不同, 从而导致锻件中心呈现 X 形状部分区域的组织较为细小, 而其余位置组织较为粗大, 低倍组织不均匀。

其原因可借由单道热压变形示意图<sup>[4]</sup> (见图 4) 进行解释。在单道热压变形过程中, 按变形程度和力学分析认为, 区位于上、下面附近, 为难变形区, 变形量最小; 区变形量稍大; 为一轴对称区, 经受强烈的压应力和沿 45° 方向的剪应力作用而成为变形量最大的区域。锻件的实际锻造过程可以视为在锻件的各个面进行多次单道次热压变形的过程, 故 区和区实际变形情况基本相同, 均为小变形区域; 而区, 即锻件中心呈 X 形状的区域由于大的变形量, 发生动态再结晶, 从而使得组织细化, 故呈现出与区和区明显不同的低倍组织。

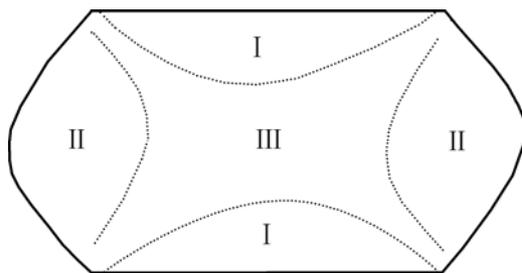


图 4 单道热压变形示意图

Fig.4 Schematic diagram of compressed sample

锻件 2 采用 4 火次锻造, 每火次变形量均相对较小, 锻件中难以产生局部应力集中区域, 故锻件 2 的低倍组织绝大部分均匀, 锻件边缘小变形量区域组织稍微粗大。

### 2.2 锻件尺寸对自由锻件组织和性能均匀性的影响

两锻件最大截面的厚度尺寸基本相同, 故理论上可以采用相同准  $\beta$  热处理制度, 从而获得相同的组织。对比两锻件的高倍组织发现, 锻件 1 的高倍组织为片层组织,  $\alpha$  集束尺寸较大 (见图 5(a)); 而锻件 2 的芯部片状组织  $\alpha$  集束尺寸较小, 初生  $\alpha_p$  的含量达到 10%。两锻件芯部组织的差别明显, 锻件 1 的芯部组织的  $\beta$  晶粒度、晶界  $\alpha$  厚度以及片状  $\alpha$  厚度均大于锻件 2 芯部组织的。

对锻件 1 及锻件 2 的自由锻件分别进行力学性能测试, 测试结果如表 1 所示。

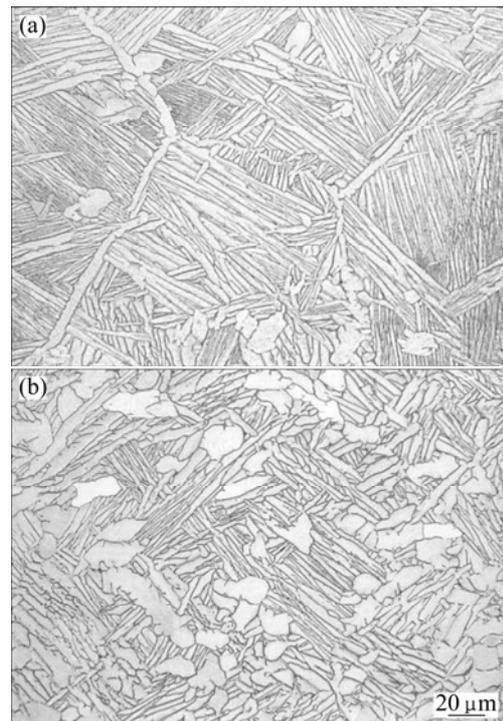


图 5 锻件 1 及锻件 2 芯部的显微组织

Fig.5 Microstructures of core region of Forging 1 (a) and Forging 2 (b)

表 1 锻件 1 及锻件 2 的室温力学性能

Table 1 Room-temperature mechanical properties of forgings 1 and 2

锻件	室温拉伸				断裂韧性, 裂纹扩展速率,	
	$\sigma_b /$ MPa	$\sigma_{0.2} /$ MPa	$\delta_5 /$ %	$\psi /$ %	$K_{IC} /$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )	(da/dN) / (mm·周 <sup>-1</sup> )
锻件 1	855	800	13	36	103-112	$\Delta K=11 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , $da/dN=3.2 \times 10^{-6}$
锻件 2	860	795	16.0	46	116-123.0 ( $K_q$ )	$\Delta K=11 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , $da/dN=8.9 \times 10^{-6}$
标准要求	825	725	8	15	90	$1 \times 10^{-5}$ ( $R=0.1$ ), $\Delta K=11 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )

组织决定性能, 两锻件高、低倍组织的差异直接导致了锻件力学性能的差别。

测试取样部位均为锻件芯部位置, 由表 1 可见, 两锻件的力学性能指标均达到了标准要求, 锻件 1 相比于锻件 2, 其强度和塑性稍低, 但断裂韧性和裂纹扩展速率等损伤容限性能较好。这是由于锻件 1 中的片层组织  $\alpha$  集束尺寸相对较大, 对于滑移的阻碍效果较小, 使滑移能够迅速在晶界  $\alpha$  处产生位错塞积, 从而容易形成空洞, 导致试样提前断裂, 故强度以及塑性较差。而锻件 2 的芯部组织由于  $\alpha$  集束较小, 且大量的  $\alpha_p$  对于减小有效滑移长度效果明显<sup>[5]</sup>, 因而在断

裂前能够产生更大变形，故强度及塑性较高。

锻件1的断裂韧度及裂纹扩展速率等损伤容限性能较好，有以下两个原因<sup>[6]</sup>：一是由于锻件1的组织中存在明显的晶界 $\alpha$ ，使得晶间断裂比例减小；二是由于其 $\alpha$ 集束的数量较多，且取向不同。裂纹往往沿片层 $\alpha$ 与 $\beta$ 的界面扩展，裂纹扩展至集束边界后，由于 $\alpha$ 集束取向的不同，继续扩展受到另一位向 $\alpha$ 集束的阻碍而被迫改变方向或分叉。这样裂纹扩展路径曲折，增加了裂纹总长度，从而吸收了更多的能量；而裂纹分叉的增加，分散了裂纹尖端的应力场，在破坏过程中吸收的能量多，故提高了合金的断裂韧性和裂纹扩展速率等损伤容限性能。而锻件2的芯部组织则由于 $\alpha$ 集束数量较少，导致裂纹扩展途径平直，分叉少，在破坏过程中吸收的能量较少，故损伤容限性能较差<sup>[7]</sup>。

### 3 结论

1) 采用单次大变形量的锻造变容易导致TC4-DT钛合金自由锻件局部组织的不均匀，而采用多道次较小变形量可以在一定程度上改善自由锻件的组织性能的均匀性。

2) 锻件尺寸影响锻件组织与性能的均匀性。故在制定锻件热处理工艺时，不能只考虑锻件的最大截面厚度，而应当综合考虑锻件的尺寸因素。

### REFERENCES

- [1] 姚泽坤, 郭鸿镇, 邹永恒, 陶红. 改善大尺寸钛合金自由锻件组织均匀性的方法[J]. 锻压技术, 2005(5): 4-6.  
YAO Ze-kun, GUO Hong-zhen, ZOU Yong-heng, TAO Hong.

Method of improving structure uniformity of big size titanium open-die forgings[J]. Forging & Stamping Technology, 2005(5): 4-6.

- [2] 李健, 周义刚. TC11钛合金 $\beta$ 锻造变形程度及其锻后热处理对组织性能的影响[J]. 机械工程材料, 1998(8): 22-24.  
LI Jian, ZHOU Yi-gang. The effect of beta forging deformation degree as well as successor heat treatment on the microstructures and mechanical properties of TC11 titanium alloy[J]. Materials of Mechanical Engineering, 1998(8): 22-24.
- [3] 罗媛媛, 杜宇, 赵永庆, 奚正平. 变形量和热处理工艺对Ti-26合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2008(4): 57-60.  
LUO Yuan-yuan, DU Yu, ZHAO Yong-qing, XI Zheng-ping. Effect of deformation and heat treatment on microstructure and properties of Ti-26 titanium alloy[J]. Material & Heat Treatment, 2008(4): 57-60.
- [4] 曲恒磊, 赵永庆, 冯亮, 奚正平, 李辉, 夏源明. TC21钛合金不同变形条件下的显微组织研究[J]. 材料工程, 2006(增刊1): 274-277.  
QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, FENG Liang, XI Zheng-ping, LI Hui, XIA Yuan-ming. Study on microstructures of TC21 alloy under different deformation conditions[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(Special 1): 274-277.
- [5] LÜTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium[M]. Springer, 2003.
- [6] FILIP R, KUBIAK K, ZIAJA W. The effect of microstructure on the mechanical properties of two phase Titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133: 84-89.
- [7] 张鑫, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.  
ZHANG Zhu, WANG Qun-jiao, MO Wei. Metallurgy and heat-treatment of titanium[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

(编辑 杨华)