

# 锻造温度对 TC4 合金组织与性能的影响

孟祥康

(西北工业大学 401 教研室, 西安, 710072)

## THE EFFECT OF FORGING TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTY OF TC4 ALLOY

Meng Xiang-kang

(Faculty 401 of Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

**摘要** 研究锻造加热温度对 TC4 合金组织与性能的影响规律。表明其均采用锻后水冷加强化热处理相同条件下, TC4 合金采用高温锻造(相变点以下  $10^{\circ}\text{C}$  至相变点以上  $5^{\circ}\text{C}$ ), 可以获得细密交错的网状  $\alpha+\beta$  组织, 或其间伴有少量等轴  $\alpha$  相的双态组织, 从而可得到高强度与高塑性的性能。本文还讨论了上述工艺使 TC4 合金有效强化的机理。

**关键词** 变形温度, 显微组织, 机械性能

**Abstract** The conventional hot-working technology of TC4 titanium alloy is to forge the alloy at  $30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$  below the transformation temperature and to anneal it subsequently. Under this process the plasticity and thermal stability of the alloy are usually quite good. Unfortunately, the strength of this alloy is relatively low and as a result the titanium forgings are often made scrapped. In this paper, the influence of a new hot-working technology on microstructure and mechanical property of TC4 alloy is investigated. Experiment results show that the network structure, which is in fine and crisscross  $\alpha+\beta$  and sometimes is accompanied with a little isoaxial  $\alpha$ , can be obtained by high temperature ( $10^{\circ}\text{C}$  below to  $5^{\circ}\text{C}$  above transformation point of this alloy) forging, under the same process of water cooling after high temperature forging and strengthening heat treatment afterwards. In this case, the alloy possesses high strength and high plasticity simultaneously. The mechanism of strengthening of this new technology is discussed in this paper.

**Key words** deformation temperature, microstructure, mechanical property

TC4 为典型的  $(\alpha+\beta)$  两相钛合金, 在航空、航天工业中已得到广泛应用。该合金的传统热加工工艺为: 在  $\beta/(\alpha+\beta)$  相变点以下  $40^{\circ}\text{C}$  左右锻造, 锻后空冷, 再进行常规退火处理 ( $780 \sim 800^{\circ}\text{C}$ ,  $1 \sim 3\text{h}$ , 空冷)。这种工艺所得到的塑性和热稳定性好, 但热强性和断裂韧性差。而且由于锻造温度低, 加之  $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}/E$  及摩擦系数  $\mu$  值高, 致使锻造塑性范围窄, 弹性回跳大、流动性能差、变形抗力大, 给生产大型、复杂的钛锻件带来了困难<sup>[1]</sup>。而钛合金的高温锻造能提高工艺塑性、改善流动性能, 使得变形抗力显著降低<sup>[3]</sup>。文献[4]对 TC11 合金高温近  $\beta$  锻后快速水冷, 结果获得了强度-塑性-韧性的良好配合。

1990 年 10 月 26 日收到, 1991 年 7 月 2 日收到修改稿

文献[1]对 TC4 合金实施的强化热处理工艺, 能在不降低塑性的条件下显著提高强度。本文拟综合应用这些成果, 探讨“高温锻造+锻后快冷+强化热处理”对 TC4 合金组织与性能的影响规律。

## 1 试验方法与试验结果

试验用原材料为直径 150mm 的轧棒, 其相变点与化学成分列于表 1。经圆盘锯下料(直径  $150 \times 50\text{mm}^2$ )后, 沿坯料表面喷涂 FR5 玻璃润滑剂。

表 1 试验用 TC4 钛合金原材料

$\beta / (\alpha + \beta)$ 相变点	Ti	Al	V	Si	Fe	C	H	O	N
995 °C	基	6.16	3.90	0.03	0.09	0.015	0.0046	0.112	0.019

传统热工艺试验: 在相变点以下 40 °C 加热, 3t 锤上锻粗成型。变形程度为了 50%, 锻后空冷, 热处理规范为 800 °C / 3h, 空冷。

新工艺试验: 选择 6 种锻造加热温度(相变点以下 40 °C、10 °C、5 °C 及相变点以上 5 °C、15 °C、25 °C 锻造, 锻后水冷, 热处理规范为: 965 °C, 1h, 水冷+800 °C, 3h, 空冷。

沿锻后饼坯弦向切取机械性能试样。金相组织取自拉伸试样夹头部分的横向中心视场。用定量金相法测试组织中等轴  $\alpha$  含量。组织与性能的测试结果列于表 2。

表 2 传统热工艺与新热工艺的组织与性能测试

热 工 艺	测 试 项 目 温 度	室温拉伸性能				400 °C / 100h 热暴露性能				400 °C 高温性能			锻态组 织等轴 $\alpha$ 量%	热处理 态等轴 $\alpha$ 量%
		$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$\psi$	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	$\psi$	$\sigma_b$	$\delta$	$\psi$		
		MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%	MPa	%	%		
传统热 工艺	相变点下 40 °C	875	852	15.0	46.7	887	872	15.0	44.0	600	14.8	62.8	44	65
新 热 工 艺	相变点下 40 °C	913	869	14.5	45.6	935	886	14.5	40.0	652	14.8	64.0	21	37
	相变点下 10 °C	965	940	12.0	42.0	980	954	11.6	36.8	680	12.2	60.5	10	23
	相变点下 5 °C	978	941	12.2	43.0	984	955	12.0	40.0	689	12.7	57.0	6	19
	相变点上 5 °C	935	907	14.0	44.5	951	927	14.0	40.2	664	14.2	59.7	—	2
	相变点上 15 °C	921	896	15.6	44.2	947	920	15.1	42.0	660	14.8	58.0	—	—
	相变点上 25 °C	934	898	12.5	38.1	942	917	12.8	38.3	672	14.0	49.0	—	—

注: 性能指标为 3 个试样的平均值

## 2 分析与讨论

传统工艺下 TC4 的室温强度及高温强度均较低(表 2), 与经新工艺热加工后的最高强度值相比, 室温强度差值达到 103MPa, 高温强度差值为 89MPa。但传统热工艺下的塑性及热稳定性良好。

新工艺的试验结果表明, 随着锻造加热温度的升高(从相变点下  $40^{\circ}\text{C}$  至相变点上  $25^{\circ}\text{C}$ ), 合金的室温强度呈“低-高-低”的变化, 且幅弥度较大。高温强度的变化规律与此相仿, 只是幅度较小。这两个强度指标均明显高于传统工艺下的强度水平。尤其是在相变点以下  $10^{\circ}\text{C}$  至相变点以上  $5^{\circ}\text{C}$  的范围内, 强度提高显著, 塑性基本保持在传统工艺下的较高水平, 热稳定性也很满意。

(1)当锻造加热温度较低(相变点下  $40^{\circ}\text{C}$ )时, 由于钛的多晶转变特性, 锻后组织中保留了较多的等轴初生  $\alpha$ (21%), 均匀分布于马氏体针基体上。经强化热处理( $965^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ , 水冷+ $800^{\circ}\text{C}/3\text{h}$ , 空冷)时, 由  $\beta$  转变的马氏体分解, 使短条魏氏  $\alpha$  等轴化, 其含量增至 37%。钛合金中等轴  $\alpha$  越多, 变形的协调作用就越大, 塑性就越好<sup>[5]</sup>。但因组织中马氏体分解的弥散化程度并不高, 致使强度水平偏低。弥散化程度不高的原因, 与锻造加热温度较低、马氏体保留的内应力较小, 使强化热处理退火时再结晶驱动力减小有关。

(2)在相变点以下  $5^{\circ}\text{C}$  锻造, 锻态组织中还保留有一定数量的等轴初生  $\alpha$ (6%), 并且此时马氏体针密集、杂乱(图 1(a)), 经强化热处理后, 形成网篮与等轴  $\alpha$  的混合组织, 其中等轴  $\alpha$  含量占 19%, 如图 1(b)。这种组织对裂纹扩展有较好的阻滞作用, 不仅有利于室温性能的提高, 而且可改善高温性能、疲劳性能及断裂韧性<sup>[4]</sup>。

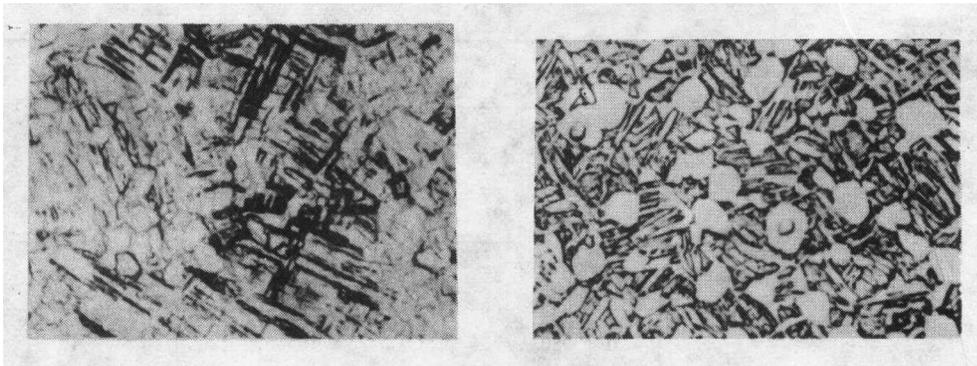


图 1 相变点以下  $5^{\circ}\text{C}$  锻造的组织  $\times 500$

(a) 锻态; (b) 热处理状态

短而乱的条状  $\alpha$  上若分布有一定数量的等轴  $\alpha$ , 裂纹扩展则必须要走更加弯曲的路程, 因而降低了裂纹扩展速率, 提高了塑性、 $K_{Ic}$  值及抗疲劳性能。图 1(a)锻态组织的  $\alpha$  含量比相变点下  $40^{\circ}\text{C}$  的锻态  $\alpha$  含量有明显降低(从 21%降至 6%), 由  $\beta$  转变的马氏体量便明显增多。强化热处理时马氏体弥散分解, 显著提高了合金的强度。

(3)在相变点以上  $15^{\circ}\text{C}$  锻造, 等轴初生  $\alpha$  相完全消失。锻造水冷后高温  $\beta$  全部转变为马氏体针状组织(图 2(a))。针状组织中的魏氏  $\alpha$  在强化热处理高温( $965^{\circ}\text{C}$ )固溶时获得能

量, 部分断开, 呈短针状。保温后的快冷过程中,  $\beta$  中析出的  $\alpha$  几乎来不及附着于短针  $\alpha$  表面而参予条状化及等轴化。这时得到了细密交错的网篮组织(图 2(b))。裂纹在这种短条、杂乱的组织界面扩展, 速率将显著降低。所以, 这时合金的塑性仍然良好, 无  $\beta$  脆性出现。

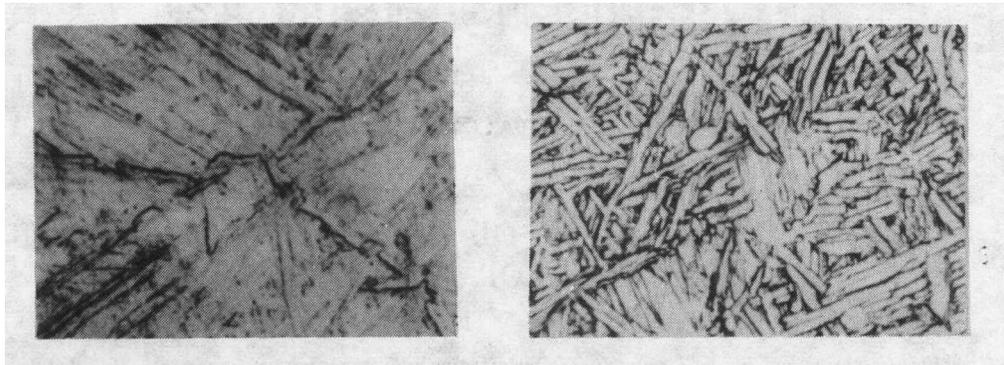


图 2 相变点以上  $15^{\circ}\text{C}$  锻造的组织  $\times 500$

(a) 锻态; (b) 热处理状态

(4) 锻造加热温度升至相变点以上  $25^{\circ}\text{C}$ , 锻态低倍晶粒已有明显长大, 肉眼可见。热处理状态下  $\alpha$  条较为平直。这种平直的  $\alpha$  与晶界  $\alpha$  的相界面正是裂纹扩展的直接通道, 有利于裂纹扩展, 导致合金的塑性及热稳定性稍有降低(表 2)。所以, 锻造加热温度也不宜过高, 超过相变点以上  $15^{\circ}\text{C}$ , 就不能有效地抑制  $\beta$  脆性的出现。因此, 锻造加热温度宜选在相变点以下  $10^{\circ}\text{C}$  至相变点以上  $5^{\circ}\text{C}$  能获得有利于高强度与高塑性配合的网状  $\alpha+\beta$  组织, 或其间混有少量等轴  $\alpha$  的双态组织。

### 参 考 文 献

- 1 孟祥康, 张恒毕. 改善 TC4 钛合金锻件机械性能的热处理工艺. 金属热处理, 1991,(1):46~49
- 2 苏祖武, 张志文. 有色金属锻造. 北京:国防工业出版社, 1979.110~147
- 3 Eylon D, Pierce C M, Hall J A. Microstructure Control of Ti-11 Alloy. Metals Engineering Quarterly, 1976,16(1):33~40
- 4 周义刚, 张宝昌. 钛合金近  $\beta$  锻造研究, 航空学报, 1989,10(1):A60~A66
- 5 王莹.  $\beta$  及近  $\beta$  热处理对 TC11 合金组织性能影响的研究. 西北工业大学硕士学位论文, 1985.