

TC25 钛合金环材 β 锻造工艺对组织与性能的影响

董 洁, 王永强, 王伟琪, 黄德超, 马宏刚, 王淑艳

(宝鸡钛业股份有限公司, 宝鸡 721014)

摘 要: 研究两种 TC25 钛合金环材的 β 锻造工艺, 分析两种方案生产的环材纵剖面宏观组织, 端面、内壁、外壁显微组织和力学性能的差异。结果表明: 在环材制坯工艺一致的情况下, 在最后一火成型时采用相变温度以上 20~50 °C、变形量在 40%~55% 的锻造工艺, 可生产出性能满足使用标准要求的 $d 450/d 350 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ TC25 钛合金 β 锻造环材。

关键词: TC25 钛合金; 环材; β 锻造工艺; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG 146.4

文献标志码: A

Effect of β -forging process on microstructure and performance of TC25 titanium alloy ring

DONG Jie, WANG Yong-qiang, WANG Wei-qi, HUANG De-chao, MA Hong-gang, WANG Shu-yan

(Baoji Titanium Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: Two different β -forging methods for manufacturing $d 450/d 350 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ TC25 titanium alloy ring were studied, vertical section structure. The difference of microstructure and mechanical property of transverse section, internal and outside wall was analyzed. The results show that, when the same forging procedure is adopted in the last forging molding process, the temperature is above phase transformation points 20 to 50 °C, and the deformation is between 40% to 55% in the forging procedure, TC25 titanium alloy ring with size of $d 450/d 350 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ can be produced, whose excellent performance meets the requirements of the corresponding employ standards.

Key words: TC25 titanium alloy; ring; β -forging process route; mechanical property; microstructure

TC25 钛合金是一种综合性能优良的 Ti-Al-Zr-Sn-Mo-W 合金系 $\alpha+\beta$ 型热强钛合金, 它兼有 TC11 合金的高热强性和 TC8 合金的热稳定性, 该合金可加工成锻件、模锻件、棒材和其他形式的产品, 在 500 °C 以下工作时间可达 6 000 h, 在 550 °C 以下工作时间可达 3 000 h, 在航空发动机上获得应用。

根据 TC25 钛合金在飞机上的使用情况, 其环材可采用 β 锻造工艺生产, 目标是使最终的零件产品断裂韧性和裂纹扩张速率性能均优于 $\alpha+\beta$ 锻造零件的^[1-5]。在此, 本文作者主要研究两种 TC25 钛合金环材 $d 450/d 350 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ β 锻造工艺, 对每种锻造工艺的显微组织和力学性能进行分析并讨论。

1 实验

试验采用工厂生产的 TC25 钛合金铸锭, 锭型为 $d 720 \text{ mm}$, 铸锭质量为 3 000 kg。铸锭经 3 次真空自耗电弧炉熔炼, 化学成分(质量分数 %): Al 6.2~7.2、Sn 0.8~2.5、Mo 1.5~2.5、W 0.5~1.5、Si 0.01~0.4、杂质总量 < 0.3、余量为钛、 $\alpha+\beta/\beta$ 相的转变温度为 990~1 010 °C。

试验按两种方案进行锻造工艺研究, 两种工艺制备的环材的制坯过程相同, 先将铸锭加热至相变点以

上较高温度，出炉后进行 1~2 火自由锻镦-拔变形，变形量大于 50%，再加热至相变点以下 20~40 ℃，出炉后进行 4~6 火的自由锻拔长变形锻制成环坯，变形量达 60%~90%。环坯显微组织为 $\alpha+\beta$ 两相区加工组织，如图 1 所示。2 种方案的工艺区别在最后一火成型，具体工艺见表 1。

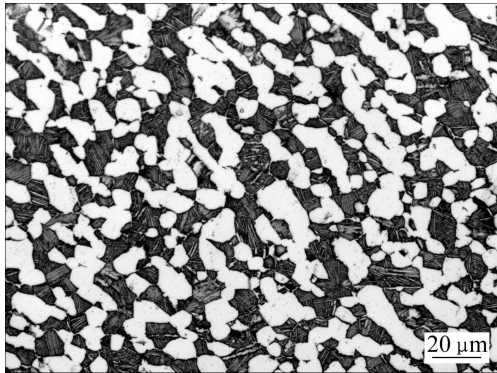


图 1 TC25 钛合金环坯的金相显微组织
Fig. 1 Original microstructure of TC25 alloy rolling

表 1 TC25 钛合金环材 β 锻造工艺

Table 1 Hot rolling process of TC25 alloy ring				
Method No.	Deformation temperature zone/℃	Holding time/min	Deformation amount/%	Forging Temperature zone/℃
1	$t_m+(20-50)$	30-60	40-55	$t_m-(10-30)$
2	$t_m+(20-50)$	30-60	20-35	$t_m+(0-20)$

2 结果与分析

2.1 变形工艺对组织的影响

2.1.1 变形工艺对低倍组织的影响

两种方案锻制的环材低倍纵剖面照片见图 2。从

图 2 可以看出，方案 1、2 的低倍组织为半清晰晶，方案 2 比方案 1 的半清晰晶低倍组织更清楚，且均匀性较差。这是由于两方案采用的加热温度都超过了相变点，晶粒已开始长大再结晶，但因为保温时间不长，不会过分长大，同时受变形量的影响，方案 1 的变形量大于方案 2 的，变形充分，所以方案 1 的低倍组织均匀性更好^[3]。

2.1.2 变形工艺对显微组织的影响

在 OLYMPUS GX71 金相显微镜下观察，按两种方案生产的 TC25 合金 $d\ 450/d\ 350\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}$ 环材端面、内壁和外壁各点经(970 ℃, 1 h, AC)+(550 ℃, 6 h, AC)固溶时效处理后的显微组织形貌，如图 3~5 所示。

从图 3~5 的显微组织照片可以看出，方案 1 的显微组织为条状 $\alpha+\beta_l$ 和条状 α 成编织状，是典型的网篮组织。这是因为合金的变形温度在 β 转变温度(β_l)以上，并且变形程度足够大，具备充分变形的条件，在 $\alpha+\beta$ 区结束锻造。使加工时形成的条状 α 相划出的 β 晶界遭到一定程度的破碎，导致 β 晶界的轮廓变得不那么完整和清晰。条状 α 相不同程度地发生歪曲，其间分布着 α 相和 β 相的混合物。条状 α 和转变 β 基体中的魏氏 α 相尺寸细小，无固定方式排列，呈网篮状交织^[6-8]。方案 2 的显微组织为条状 α +片状 $\alpha+\beta_l$ 。条状 α 粗大、平直，片状 α 取向几乎相同，形成大的 α 集束。这是由于方案 2 的加热温度在相变点以上，变形量不充分，长大的 α 相平直无扭曲。同时，在 β 区结束锻造，从 β 区开始冷却，由于冷却速度慢，具备长大再结晶的温度和时间。方案 1 的显微组织是理想组织状态，达到了使用标准要求。

2.2 变形工艺对力学性能的影响

分别在经过两种锻造工艺的环材上制取试样，试

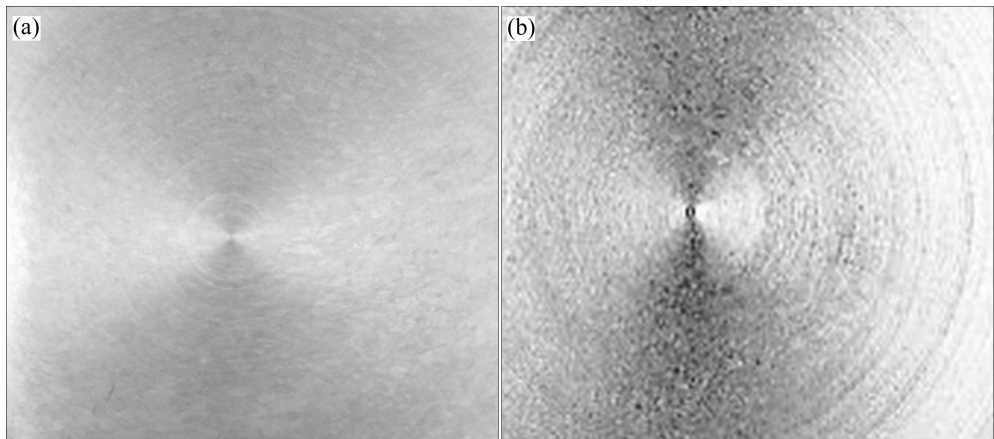


图 2 不同方案锻制环材纵剖面照片
Fig. 2 Vertical section photos of ring after different forging methods: (a) Method 1; (b) Method 2

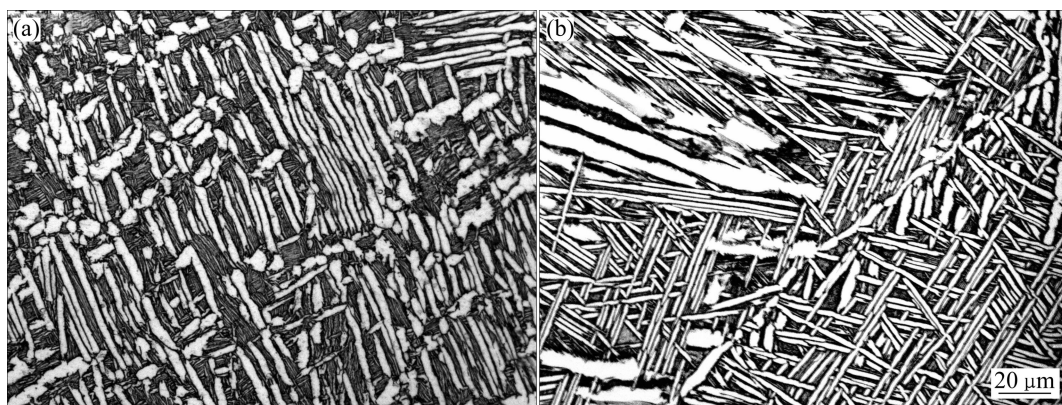


图 3 不同方案锻造环材端面横向显微组织

Fig. 3 Orientation microstructures of ring end surface after different forging methods: (a) Method 1; (b) Method 2

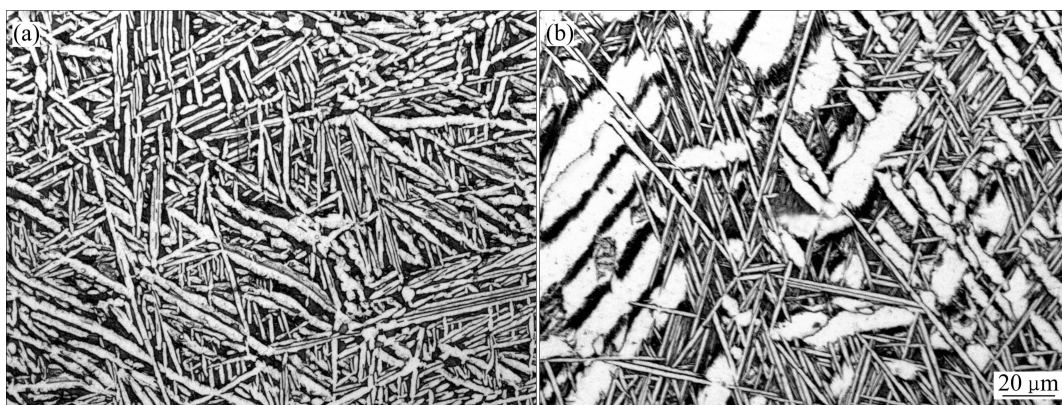


图 4 不同方案锻造环材内壁横向显微组织

Fig. 4 Orientation microstructures of ring internal surface after different forging methods: (a) Method 1; (b) Method 2

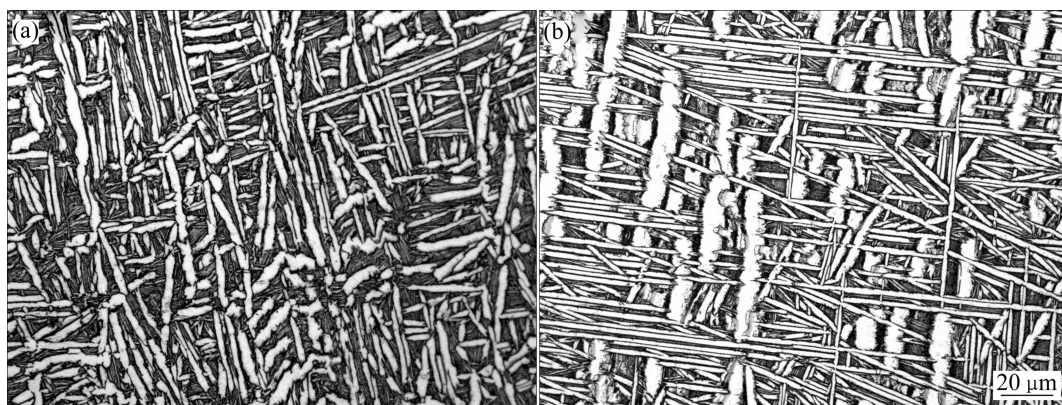


图 5 不同方案锻造环材外壁横向显微组织

Fig. 5 Orientation microstructures of ring outer surface after different forging methods: (a) Method 1; (b) Method 2

样经(970 °C、1 h, AC)+(550 °C、6 h, AC)热处理后, 进行室温拉伸、冲击、500 和 550 °C 高温拉伸、持久性能的测试。

从表 2~4 中可以看出, 方案 2 的室温、500 °C 和 550 °C 的高温强度和塑性值都比方案 1 的低, 且 550 °C 高温强度值没有满足使用标准要求。这是由于网篮组织和片层组织变形机理不一样。网篮组织材料的拉伸

变形在 α 相个别晶粒中以滑移开始, 随着变形程度的加深, 滑移占据越来越多的 α 晶粒, 向周围的转变 β 组织扩展, 滑移带间距小, 晶界处位错塞积应力小, 推迟了空洞的形核和发展, 提高材料的强度和塑性。片层组织中由于同一 α 束具有相同的惯习面, 位错能毫无阻碍地穿过互相平行的 α 束, 垂直滑距长, 易出现粗滑移带和微区变形不均匀, 在晶界处易产生严重

表 2 不同锻造工艺制备的环材的室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of TC25 alloy ring by different methods at room temperature

Method No.	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	A_k /(J·cm ⁻²)
1	1050	910	17.5	34.5	56
	1060	920	15.5	31.5	58
2	995	850	12.5	24.5	56
	1010	860	10.0	21.5	49
Standard	≥980	—	≥7	≥15	≥29.4

表 3 500 ℃时不同锻造工艺制备的环材的力学性能

Table 3 Mechanical properties of TC25 alloy ring at 500 ℃

Method No.	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	Stress-rupture (637 MPa)
1	780	—	19.5	66.5	≥50 h
	785	—	16.0	45.0	
2	735	—	17.5	41.0	≥50 h
	740	—	15.5	34.5	
Standard	≥735	—	—	—	≥50 h

表 4 550 ℃时不同锻造工艺制备的环材的力学性能

Table 4 Mechanical properties of TC25 alloy ring at 550 ℃

Method No.	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%	Stress-rupture (441 MPa)
1	705	—	23.0	69.5	≥50 h
	710	—	22.5	72.0	
2	680	—	18.0	45.0	≥50 h
	685	—	19.0	51.0	
Standard	≥686	—	—	—	≥50 h

的位错塞积，促进空洞的形成和发展，导致试样过早断裂^[5-6]，所以采用方案 1 锻造环材的各温度强度和塑性值都较方案 2 的高。

同时，按两种方案生产的环材的冲击和高温持久性能无明显差异，这是由于网篮组织和片层组织的冲击和高温持久性能较好^[9-10]。

3 结论

采用最后一火成型时选用相变温度以上 20~50 ℃，保温 30~60 min，变形量 40%~55%，终锻温度在相变点以下的锻造工艺，可生产出显微组织为网篮组织，各项性能满足使用要求的 TC25 钛合金 d 450/ d 350 mm×60 mm β 锻造环材。

REFERENCES

[1] 朱知寿, 曾卫东, 俞汉卿. 钛合金高温变形强韧化机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 539-542.
ZHU Zhi-shou, ZENG Wei-dong, YU Han-qing. High-temperature aurfoming strengthening mechanism of titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(S3): 539-542.

[2] 王永琪. TC25 钛合金的组织 and 性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 251-258.
WANG Yong-qi, et al. Microstructure and performance of TC25 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(S3): 251-258.

[3] ALEXANDER J D. 宇航材料的锻造和性能[M]. 贺开运, 孙荣科, 袁瑞琛, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1977: 300.
ALEXANDER J D. Forging and properties of aerospace materials[M]. HE Kai-yun, SUN Rong-ke, YUAN Rui-chen, et al, transl. Beijing: National Defense Industry Press, 1977: 300.

[4] 周义刚, 周军, 刘建超. 航空发动机用高温钛合金[J]. 中国工程科学, 2001, 3(5): 61-65.
ZHOU Yi-gang, ZHOU Jun, LIU Jian-chao. High-temperature titanium alloys for aeroengine[J]. Engineering Science, 2001, 3(5): 61-65.

[5] 陈兴汉, 马荣国. 真空熔炼[M]. 宝鸡, 1985: 49.
CHEN Xing-han, MA Rong-guo. Vacuum melting[M]. Baoji, 1985: 49.

[6] 稀有金属加工手册编写组. 稀有金属加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 447.
Rare Metal Process Handbook Compiling Group. Rare metal process handbook[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984: 447.

[7] B K 亚力山大, et al. 钛合金半成品加工[M]. 宁兴龙, 译. 西安: 金属材料与工程, 1996: 191.
B K 亚力山大, et al. Process of Ti alloy semi-manufactured goods[M]. NING Xing-long, transl. Xi'an: Rare Metal Materials and Engineering Press, 1996: 191.

[8] E A 鲍利索瓦. 钛合金金相学[M]. 陈石卿, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1986: 198.
BOLESUWA E A. Titanium alloy microstructure[M]. CHENG Shi-qing, et al, transl. Beijing: National Defense Industry Press, 1986: 198.

[9] 张志芳. 热强钛合金[M]. 北京: 621 所, 1984: 55.
ZHANG Zhi-fang. Hot-strength titanium alloy[M]. Beijing: 621 Institute, 1984: 55.

[10] 苏祖武, 孟国文, 郭鸿镇, 刘建超, 姚泽坤, 杨昭苏, 胡宗式. 钛合金 β 锻造组织不均匀性研究[J]. 金属学报, 1991, 27(5): 299-302.
SU Zu-wu, MENG Guo-wen, GUO Hong-zhen, LIU Jian-chao, YAO Ze-kun, YANG Zhao-su, HU Zong-shi. Microstructure heterogenicity of β -forging titanium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1991, 27(5): 299-302.

(编辑 龙怀中)