

航空发动机用大规格 TC17 钛合金棒材显微组织均匀性研究

邓雨亭^{1,2}, 李四清^{1,2}, 王 旭^{1,2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院 先进钛合金航空科技重点实验室, 北京 100095)

(2. 中国航空发动机集团先进钛合金重点实验室, 北京 100095)

摘要: 利用电子背散射衍射(EBSD)技术对 $\phi 500$ mm TC17 钛合金棒材显微组织的均匀性进行了研究, 分析了不同部位 α 、 β 相的晶体取向。结果表明, 棒材边部和心部的初生 α 相等轴化良好, 取向分布均匀; 锻后冷却速度会影响棒材边部和心部组织中等轴 α 相的晶粒尺寸, 心部显著大于边部。在光学显微镜下原始 β 晶界不明显, 但心部组织中出现的 β 相基本保持取向一致的“宏区”, 说明原始 β 晶粒破碎程度不足。对于大规格 TC17 钛合金棒材, 仅凭借显微组织判定其均匀性存在漏洞, 需增加 β 晶粒度检查以规避后续出现粗大原始 β 晶粒的风险。

关键词: TC17 钛合金; 显微组织; 电子背散射衍射; 原始 β 晶粒

中图分类号: TG146. 23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)05-010-04

Microstructure Homogeneity of Large Size TC17 Titanium Alloy Bar for Aero-engine

Deng Yuting^{1,2}, Li Siqing^{1,2}, Wang Xu^{1,2}

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Titanium Alloys, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. Aviation Key Laboratory on Advanced Titanium Alloys of AECC, Beijing 100095, China)

Abstract: Electron backscattered diffraction (EBSD) technique was employed to investigate the homogeneity of microstructure of $\phi 500$ mm TC17 titanium alloy bar and analyze the orientation of α and β phases in different regions. The results show that the primary α phase of the edge and core are excellent equiaxed grains and have uniform distribution on orientation. The grain size of equiaxed α phase of the core is significantly larger than the edge caused by the cooling rate after forging. The prior β grain boundary is not significant under the optical microscope, but the macro region of the β phase basically keeping the same orientation appeared in the core, indicating that the prior β grain broken degree is insufficient. Therefore, only using the microstructure to determine the homogeneity is not enough for large size TC17 titanium alloy bars. The inspection of β grain size should be increased to avoid the risk of subsequent occurrence of coarse prior β grain.

Key words: TC17 titanium alloy; microstructure; EBSD; prior β grain

TC17 钛合金名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (质量分数, $w/\%$), 是一种最高使用温度为 427 °C 的高强、高韧和高淬透性的富 β 相两相钛合金^[1,2], 被广泛用于制造航空发动机风扇和压气机盘件。为得到具有良好断裂韧度和蠕变性能的 TC17 钛合金锻件, 通常先在 $\alpha + \beta$ 两相区多火次锻造得到双态组织, 再经单火次 β 锻造得到网篮组织^[3]。棒材的组

织均匀性直接影响锻件的组织性能。组织不均匀的棒材被加热到相变点以上, 极易出现局部原始 β 晶粒粗大的问题, 进而影响盘类锻件的性能^[4]。由于 TC17 钛合金中含有 4% 的易偏析元素 Cr, 有较为严重的 β 斑倾向, 因而大规格棒材锻造难度较大^[5,6]。随着新一代航空发动机向风扇和压气机盘级数减少、转速增加、高温段前移、结构整体化发展^[7], 航空发动机风扇盘锻件对尺寸的要求不断增大, 亟需对大规格 TC17 钛合金棒材组织进行深入研究, 这对于制备组织均匀的大型整体叶盘类锻件至关重要。

王凯旋等^[8]采用 β 单相区开坯+两相区多火次锻造得到大规格 TC17 钛合金棒材, 利用光学显微镜分析了棒材不同部位的显微组织, 未发现不连续的晶界 α 相、长条 α 相、大块团聚 α 相等异常组织, 从边缘到中心位置的 β 晶粒大小一致, 无异常大晶粒出现, 均匀性良好。对于 TC17、TC19 等后续进行 β 锻造的钛合金, 需要获取半成品棒材显微组织中的原始 β 晶粒形貌, 以确定显微组织均匀性能否满足需求。目前, 普遍通过分析初生等轴 α 相形貌和含量等特征来判别锻件的组织均匀性。但在实际棒材评估中发现, 在光学显微镜和扫描电子显微镜下不同部位初生 α 相等轴化良好, 含量无明显差异, 未见较长的断续晶界 α 相, 且难以观察出原始 β 晶界的痕迹, 因而无法判定原始 β 晶的粒均匀程度。电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 技术是材料学研究的重要表征手段之一, 在研究材料晶体学取向、织构、相变及其位向关系等方面有着独特的优势。本研究采用 EBSD 技术分析大规格 TC17 钛合金棒材不同部位等轴 α 相和 β 基体相的取向分布, 表征原始 β 晶粒并分析其组织均匀性, 以期为大规格 TC17 钛合金棒材锻造工艺优化和相关检验方法改进提供借鉴。

1 实验

实验所用 TC17 钛合金铸锭经 3 次真空自耗熔炼

而成, 铸锭直径为 750 mm, 化学成分 (质量分数, $w/\%$) 为 Al 5.23, Sn 2.07, Zr 2.01, Mo 4.10, Cr 3.90, Fe 0.05, O 0.10, Ti 余量。铸锭经 β 单相区和 $\alpha+\beta$ 两相区多火次锻造得到 $\phi 500$ mm 棒材, 采用金相法测得其 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相转变温度为 900 $^{\circ}\text{C}$ 。从棒材上切割 30 mm 厚试片, 进行双重固溶退火 (840 $^{\circ}\text{C}/1$ h/AC + 800 $^{\circ}\text{C}/4$ h/WC) 和时效 (630 $^{\circ}\text{C}/8$ h/AC) 处理。从热处理后试片纵剖面的心部和边缘各取 15 mm \times 10 mm 的方形金相试样和 EBSD 试样, 然后进行研磨和机械抛光处理。金相试样用 Kroll 腐蚀液 (5% HF + 10% HNO₃ + 85% H₂O) 腐蚀后, 采用 Leica DMI 3000M 型卧式金相显微镜进行组织观察。EBSD 试样经过电解抛光 (电解抛光液配比为: 5vol% 高氯酸、35vol% 正丁醇和 60vol% 甲醇) 后, 采用配备 Hikar'i XP 探头的 JSM 7900F 扫描电子显微镜进行 EBSD 观察和分析, 测试扫描步长为 0.5 μm 。利用 OIM 软件对 EBSD 数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 显微组织分析

图 1 为锻态和热处理态 TC17 钛合金棒材不同部位的金相照片。由图 1 可知, 热处理前后 TC17 钛合金棒材边部和心部的显微组织无明显差异, 均为细小均匀的双态组织。其中, 热处理态组织由等轴初生 α 相和含针状 α 相的转变 β 相组成 (图 1c)。在 $\alpha+$

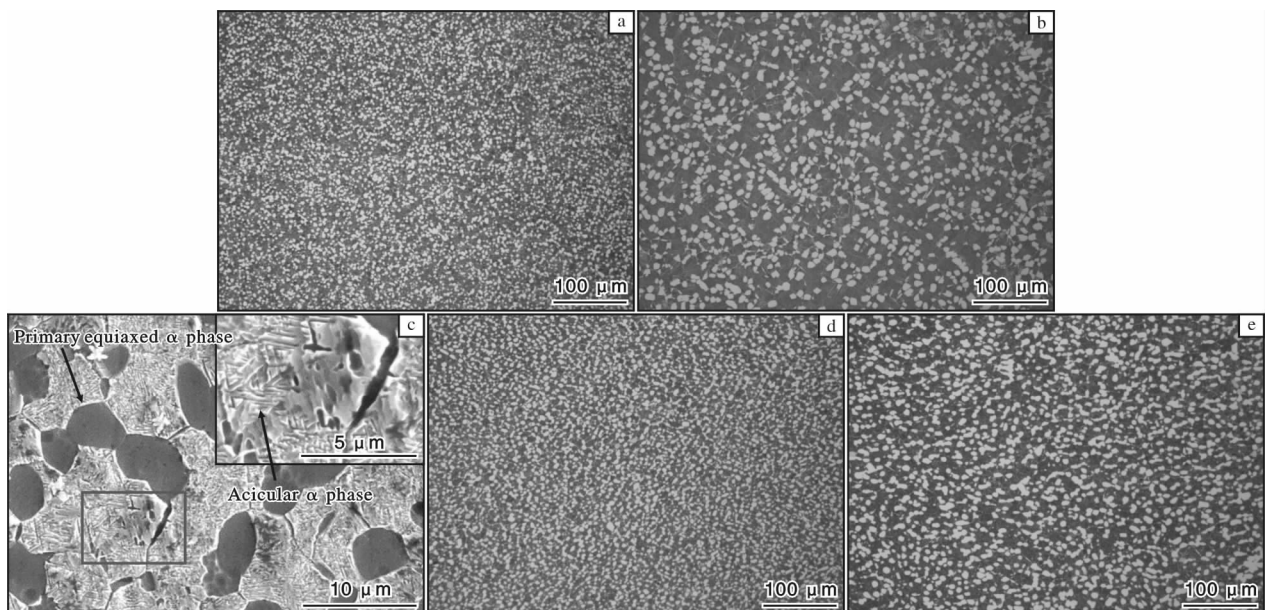


图 1 锻态和热处理态 TC17 钛合金棒材不同部位的金相照片

Fig. 1 Metallographs in different areas of TC17 titanium alloy bar: (a) edge, as forged; (b) core, as forged; (c, d) edge, after heat treated; (e) core, after heat treated

β 两相区有较为充分的变形, 由 α 片层集束球化形成的初生 α 相等轴化良好, 未见朝某一方向拉长, 方向性弱; 未见较长的断续晶界 α 相和团聚的大块 α 相, 难以辨别原始 β 晶界。边部和心部的等轴初生 α 相比比例无明显差异, 均为 30% 左右, 但由于自由锻后冷却速度的差异, 心部等轴初生 α 相平均晶粒尺寸约为 $5.4 \mu\text{m}$, 大于边部的 $4.2 \mu\text{m}$ 。然而, 仅仅是等轴初生 α 相尺寸的差异并不足以导致棒材后续加热到 β 单相区出现局部晶粒粗大的现象, 需要对组织进行取向分析。

2.2 α 相和 β 相取向分析

TC17 钛合金棒材经 $\alpha + \beta$ 两相区多次热变形后, β 相在取向、局部织构和晶界演变上会发生显著的变化, 相比于变形前晶体取向杂乱且出现很多小角度和大角度晶界^[9,10]。当 TC17 钛合金加热到相变点以上后, 无论是否发生变形, 原始 β 晶粒内部的 β 相均保持同一取向^[11,12], 因此本研究将 TC17 钛合金棒材组织中 β 相取向基本相同的“宏区”认定为一个原始 β 晶粒。另外, 本研究热处理制度为两相区双重固溶和时效, 不会对 β 相取向产生影响, 因此仅对热处理态的组织进行取向分析。

图 2 为 TC17 钛合金棒材边部和心部的 β 相取向分布图。图 3 为 TC17 钛合金棒材边部和心部的 β 相反极图。由图 2a 可知, 棒材边部经过充分的大变形后, 整个扫描区域内 β 相取向杂乱, 相邻 β 晶粒之间的取向差较大, 大部分原始 β 晶粒(图 2 中黑色轮廓)被显著破碎至 $200 \mu\text{m}$ 以下, 存在 $\langle 111 \rangle$ 与棒材拔长方向平行的弱丝织构, 织构强度仅约为 1.5 (图

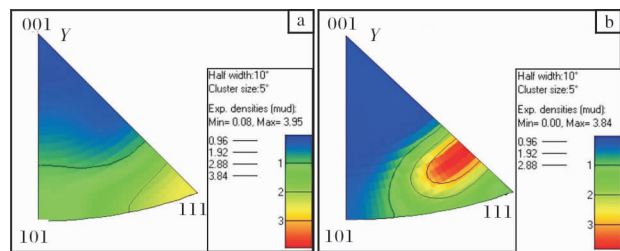


图 3 TC17 钛合金棒材不同部位的 β 相反极图
Fig. 3 Inverse pole figure (IPF) maps in different areas of β phase of TC17 titanium alloy bar: (a) edge; (b) core

3a)。由图 2b 可知, 棒材心部组织中原始 β 晶粒尺寸较大, 大部分可达 $200 \sim 400 \mu\text{m}$, β 相的取向分布趋于均匀, 也存在 $\langle 111 \rangle$ 与棒材拔长方向平行的弱丝织构, 但强度增加到 2.5 (图 3b)。因此, 对于大规格 TC17 钛合金棒材, 即使其组织在光学显微镜下较为均匀, 依然可能存在粗大原始 β 晶粒, 有必要对其进行 β 晶粒度检查。由于 TC17 钛合金易产生 β 斑, Lütjering 等^[13] 建议铸锭直径不宜超过 750 mm , 且需要在铸锭熔炼后增加长时间的 β 单相区均匀化热处理以改善合金元素偏析^[6]。铸锭的原始 β 晶粒粗大, 加上 TC17 钛合金两相区变形抗力较大, 在锻造大规格棒材时, 心部和边部存在较大的变形量差异, 边部集中了较大的变形量, 导致形成曲折状的 α 相并通过增加位错密度促进 β 相的连续动态再结晶, 等轴 α 相的尺寸影响了 β 相取向的演变, 当细小弥散的等轴 α 相嵌入 β 基体中, 其可作为钉扎的“第二相粒子”, 通过晶界滑动促进 β 相的再结晶, 甚至在较高的应变速率下, 通过动态回复再结晶形成更多更细小的再结晶 β 晶粒^[9]。而心部组织由于变形量较小, 加上晶粒之间的协调变形, 小部分取向的晶粒变形难度大, 热变形过程中产生的位错和亚晶界等较少, 后续加热使大部分变形晶粒发生回复, 因而 β 相再结晶比例小, 依旧保持了粗大的晶粒。虽然心部的变形量较小, 但足以将粗大的晶界 α 相断开, 导致未见较长的断续晶界 α 相和团聚的大块 α 相, 以至于在金相显微镜下难以发现原始 β 晶界的痕迹。

图 4 为 TC17 钛合金棒材边部和心部的 α 相取向分布图。由图 4a、4b 可知, 边部和心部组织中等轴初生 α 相的取向分布杂乱, 宏观区域内均未出现某单一取向的等轴 α 相聚集, 与 β 基体的取向无明显联系, 适当的变形量促进 α 片层球化为取向杂乱的等轴 α 相。由图 4c 可知, 针状 α 相的取向相对杂

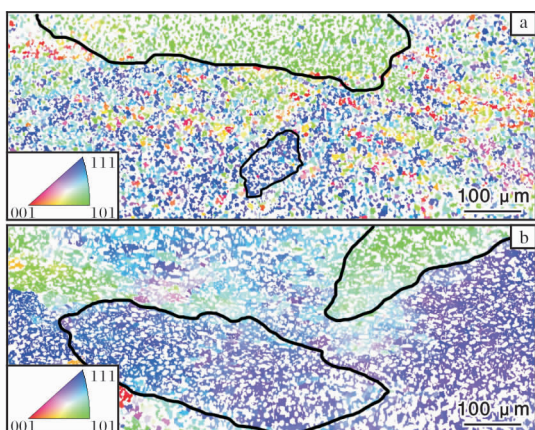


图 2 TC17 钛合金棒材不同部位的 β 相取向分布图
Fig. 2 Orientation maps in different areas of β phase of TC17 titanium alloy bar: (a) edge; (b) core

乱, 针状 α 相为锻后冷却和时效过程中析出的次生 α 相, 可以认为在锻后冷却和时效热处理过程中, $\beta \rightarrow \alpha$ 相的转变过程中发生了 α 相的变体选择^[14]。单个孤立的等轴初生 α 相内部存在亚晶界且取向差较小(图 4c), 为小角度晶界。因此, 增大心部变形量可能在等轴 α 相内部形成大角度晶界甚至达到细化晶粒的效果, 有机会改善因冷却速度导致的等轴 α 相尺寸差异。

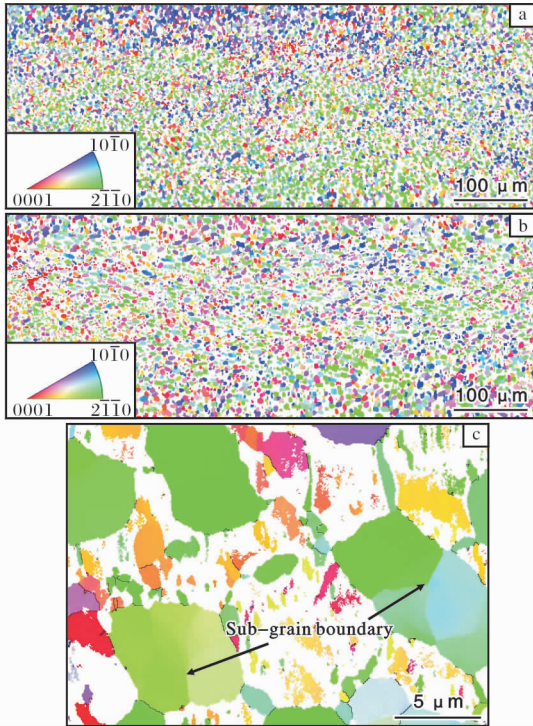


图4 TC17 钛合金棒材不同部位的 α 相取向分布图

Fig. 4 Orientation maps in different areas of α phase of TC17 titanium alloy bar: (a) edge; (b) core; (c) local enlarged map in Fig. 4b

3 结 论

(1) 大规格 TC17 钛合金棒材边部和心部组织中初生 α 相等轴化良好, 取向分布均匀, 宏观区域内均未出现单一取向的等轴 α 相聚集。

(2) 边部等轴 α 相晶粒尺寸明显小于心部, 锻后冷却速度是影响等轴 α 相晶粒尺寸的主要因素, 边部等轴 α 相内部存在亚晶界组织, 多为小角度晶界。

(3) 边部和心部区域在光学显微镜下原始 β 晶界不明显; 通过 EBSD 分析可知心部组织原始 β 晶粒破碎程度不足, 晶粒尺寸较大。对于大规格 TC17

钛合金棒材, 有必要增加 β 晶粒度检查以规避后续出现粗大原始 β 晶粒的风险。

参考文献 References

- [1] Chen W. High temperature deformation behavior of TC17 alloy [J]. *Materials Sciences and Applications*, 2018, 9 (9): 732–739.
- [2] 邓雨亭, 李四清, 黄旭, 等. 航空发动机用 β 锻 TC17 钛合金时效析出行为研究 [J]. *航空制造技术*, 2018, 61 (9): 59–63.
- [3] 俞汉清, 曾卫东, 周义刚, 等. Ti-17 合金 β 锻造研究 [J]. *西北工业大学学报*, 1995, 13(3): 340–345.
- [4] Shi X H, Zeng W D, Zhao Q Y. The effects of lamellar features on the fracture toughness of Ti-17 titanium alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 636: 543–550.
- [5] Shamblen C E. Minimizing beta flecks in the Ti-17 alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1997, 28: 899–903.
- [6] Avyle J, Brooks J A, Powell A C. Reducing defects in remelting processes for high-performance alloys [J]. *Journal of Materials*, 1998, 50(3): 22–25.
- [7] Paniagua G, Szokol S, Kato H, et al. Contrarotating turbine aero-design for an advanced hypersonic propulsion system [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(6): 1269–1277.
- [8] 王凯旋, 冯贞伟, 丁永峰, 等. TC17 钛合金超大规格棒材的制备 [J]. *钛工业进展*, 2014, 31(5): 32–35
- [9] Li L, Li M Q, Luo J. Mechanism in the β phase evolution during hot deformation of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr with a transformed microstructure [J]. *Acta Materialia*, 2015, 94: 36–45.
- [10] Germain L, Gey N, Humbert M, et al. Texture heterogeneities induced by subtransus processing of near α titanium alloys [J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(16): 4298–4308.
- [11] Salib M, Teixeira J, Germain L, et al. Influence of transformation temperature on microtexture formation associated with α precipitation at β grain boundaries in a β metastable titanium alloy [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(10): 3758–3768.
- [12] 邓雨亭, 李四清, 黄旭. β 锻 TC17 钛合金力学性能各向异性研究 [J]. *稀有金属*, 2018, 42(8): 885–890.
- [13] Lütjering G, Williams J C. *Titanium [M]*. 2nd Edition. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 63.
- [14] 赵子博, 王国强, 杨晓龙, 等. Ti-6246 中 α 相转变织物的形成机制 [J]. *材料研究学报*, 2017, 31(10): 796–800.