

# 热连轧工艺对 TC16 钛合金棒材组织与力学性能的影响

屈磊, 赵爱武, 李典, 潘曦, 李婷, 蔡建华, 秦成

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 马氏体型 TC16 钛合金因优异的强塑性匹配、淬透性及冷镦成形性能, 被广泛用作航空航天紧固件。针对该合金棒材成形工艺复杂、成本高, 以及组织均匀性差和批次稳定性不足的问题, 本研究设计了不同热连轧工艺, 系统探究了 TC16 钛合金棒材在热轧态(R)、退火态(M)及固溶时效态(STA)下的显微组织与力学性能演变规律。结果表明, TC16 钛合金热连轧过程对温度敏感, 棒材不同部位变形量与温度分布的差异导致组织演变不同, 且该组织差异无法通过后续热处理消除。随着轧制道次增加, 初生  $\alpha$  相含量降低, 组织细化, 不同部位组织差异减小。采用工艺IV制备的 M 态棒材组织均匀, 具有较好的综合力学性能; 经固溶时效处理后, 其平均显微维氏硬度达 360 HV, 抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 1163 MPa、1072 MPa 和 16.3%。通过热连轧—退火—固溶时效工艺, 最终制备出符合标准要求的紧固件用棒材。

**关键词:** TC16 钛合金; 棒材; 热连轧工艺; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.23; TG337.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)05-010-07

## Effects of Hot Tandem Rolling Processes on Microstructure and Mechanical Properties of TC16 Titanium Alloy Bars

Qu Lei, Zhao Aiwu, Li Dian, Pan Xi, Li Ting, Cai Jianhua, Qin Chen

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** Martensitic TC16 titanium alloy is widely utilized in aerospace fasteners owing to its excellent strength-ductility balance, hardenability, and cold heading formability. To address the prominent challenges of TC16 titanium alloy bars, including complex forming processes, high costs, poor microstructural homogeneity, and insufficient batch stability, this study designed multiple hot tandem rolling processes and systematically investigated the evolution of microstructure and mechanical properties of TC16 bars in hot-rolled (R), annealed (M), and solution-aged (STA) states. The results reveal that the hot tandem rolling process of TC16 titanium alloy is sensitive to temperature. Variations in deformation degree and temperature distribution across different regions of the rolled bars lead to heterogeneous microstructural evolution, which cannot be eliminated by subsequent heat treatment. With increasing rolling passes, the content of primary  $\alpha$  phase decreases, the microstructure is refined, and regional microstructural heterogeneity is effectively reduced. The M state bar prepared by Process IV exhibits a homogeneous microstructure and excellent comprehensive mechanical properties. After solution-aging treatment, its average micro-Vickers hardness reaches 360 HV; the ultimate tensile strength, yield strength, and elongation are 1163 MPa, 1072 MPa, and 16.3%, respectively. Finally, bars for fasteners meeting relevant standards were fabricated via the hot tandem rolling-annealing-solution aging process.

**Keywords:** TC16 titanium alloy; bar; hot tandem rolling; microstructure; mechanical properties

紧固件被誉为“工业之米”, 其中航空航天领域

钛合金紧固件年需求量约 3000 万件<sup>[1-2]</sup>。面对国外对钛合金等关键材料的出口限制, 我国提出材料国产化重大发展战略, 亟待对钛合金等关键材料进行技术攻关, 以实现完全国产化, 满足航空航天等关键领域的

收稿日期: 2026-03-04

基金项目: 陕西省财政厅功能材料专项(0501YC2312)

通信作者: 屈磊(1986—), 男, 高级工程师。

快速发展需求。

马氏体型 TC16 钛合金是典型的航空航天紧固件材料,具有优异的强塑性匹配、淬透性及冷镦成形性能<sup>[3-5]</sup>。TC16 钛合金棒材的传统制备工艺为熔炼—锻造—径锻—轧制—拉拔—热处理等,该工艺流程复杂,成本较高。为优化钛合金棒材制备工艺,国内引进了先进的热连轧技术并开展了相关研究。例如,朱峰等<sup>[6]</sup>采用热连轧工艺制备了 TC4 钛合金棒材,发现热连轧工艺对棒材外形尺寸的控制更为精确。秦桂红等<sup>[7]</sup>研究了不同热连轧工艺下 TC6 钛合金的温度场与组织演变,发现由于棒材心部散热较慢,心部与边部存在较大温差,导致不同位置的组织差异明显。孙虎代等<sup>[8]</sup>对比了传统横列式轧制和纵连轧工艺,发现连轧工艺制备的 TC16 钛合金线材组织更细小均匀。

综合以上文献分析可知,热连轧工艺制备钛合金棒材具有尺寸控制精度高、自动化程度高和工艺可重复性强等优点。但目前国内热连轧工艺尚不完善,制备的钛合金棒材组织均匀性和批次稳定性难以保证,且 TC16 钛合金棒材在冷成形时存在变形不均匀和开裂现象<sup>[9-10]</sup>。针对目前 TC16 钛合金棒材制备中存在的主要问题,探究了不同热连轧工艺对 TC16 钛合金棒材组织和力学性能的影响,旨在利用高效率、低成本

的热连轧工艺制备出组织均匀、力学性能优异的 TC16 钛合金棒材。

## 1 实验

实验用 TC16 钛合金铸锭经 3 次真空自耗电弧熔炼制备,其化学成分如表 1 所示,利用金相法测得其  $\beta$  相变点( $T_\beta$ )为  $863\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 。该铸锭依次经 3 火次自由锻造及 1 火次径向锻造,获得直径为 100 mm 的棒坯。

表 1 TC16 钛合金铸锭的化学成分(w/%)

| Table 1 Chemical composition of TC16 titanium alloy ingot |      |      |       |       |      |
|-----------------------------------------------------------|------|------|-------|-------|------|
| Al                                                        | Mo   | V    | Fe    | Si    | Ti   |
| 3.41                                                      | 4.90 | 4.50 | 0.182 | 0.017 | Bal. |

为探究热连轧工艺参数对 TC16 钛合金棒材组织与性能的影响,针对径锻后的  $\phi 100\text{ mm}$  棒坯设计了多组热连轧试验:在  $880\text{ }^\circ\text{C}$  或  $840\text{ }^\circ\text{C}$  下进行粗轧,将棒材直径从 100 mm 减至 55 mm;随后经在线感应加热或炉内加热至设定轧制温度( $760$ 、 $780$ 、 $800\text{ }^\circ\text{C}$ ),采用连轧机组依次轧制至  $\phi 30\text{ mm}$ 、 $\phi 15\text{ mm}$  和  $\phi 9\text{ mm}$ ,轧制线速度为  $4.5\text{ m/s}$ ;最后实施强制风冷处理。具体热连轧工艺参数见表 2。

表 2 TC16 钛合金棒材热连轧工艺参数

| Table 2 Hot tandem rolling process parameters of TC16 titanium alloy bars |                                                                                   |                                                          |                                                                                                                                                 |                    |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Process                                                                   | Rough rolling                                                                     | Intermediate heating method                              | Multi-pass tandem rolling                                                                                                                       | Cooling condition  |
| I                                                                         | $880\text{ }^\circ\text{C}$<br>$\phi 100\text{ mm} \rightarrow \phi 55\text{ mm}$ | On-line induction heating<br>$800\text{ }^\circ\text{C}$ | $\phi 55\text{ mm} \rightarrow \phi 30\text{ mm} \rightarrow \phi 15\text{ mm} \rightarrow \phi 9\text{ mm}$<br>linear speed = $4.5\text{ m/s}$ | Forced-air cooling |
| II                                                                        | $880\text{ }^\circ\text{C}$<br>$\phi 100\text{ mm} \rightarrow \phi 55\text{ mm}$ | Furnace heating<br>$800\text{ }^\circ\text{C}$           | $\phi 55\text{ mm} \rightarrow \phi 30\text{ mm} \rightarrow \phi 15\text{ mm} \rightarrow \phi 9\text{ mm}$<br>linear speed = $4.5\text{ m/s}$ | Forced-air cooling |
| III                                                                       | $880\text{ }^\circ\text{C}$<br>$\phi 100\text{ mm} \rightarrow \phi 55\text{ mm}$ | On-line induction heating<br>$780\text{ }^\circ\text{C}$ | $\phi 55\text{ mm} \rightarrow \phi 30\text{ mm} \rightarrow \phi 15\text{ mm} \rightarrow \phi 9\text{ mm}$<br>linear speed = $4.5\text{ m/s}$ | Forced-air cooling |
| IV                                                                        | $840\text{ }^\circ\text{C}$<br>$\phi 100\text{ mm} \rightarrow \phi 55\text{ mm}$ | Furnace heating<br>$760\text{ }^\circ\text{C}$           | $\phi 55\text{ mm} \rightarrow \phi 30\text{ mm} \rightarrow \phi 15\text{ mm} \rightarrow \phi 9\text{ mm}$<br>linear speed = $4.5\text{ m/s}$ | Forced-air cooling |

为系统研究热轧态(R)、退火态(M)及固溶时效态(STA) TC16 钛合金棒材的显微组织演变规律及力学性能差异,对热轧棒材分别进行退火处理( $760\text{ }^\circ\text{C}$ 保温  $1.5\text{ h}$ ,炉冷至  $500\text{ }^\circ\text{C}$  后空冷)和固溶时效处理( $800\text{ }^\circ\text{C}/2\text{ h/WQ} + 540\text{ }^\circ\text{C}/7\text{ h/AC}$ )。

采用 OLYMPUS PMG3 型金相显微镜对 TC16 钛合金棒材横向显微组织进行表征,观察不同状态及不同轧制道次下合金的组织形貌与相组成特征。采用 401MVD 型显微维氏硬度计进行显微维氏硬度测试,试验载荷为  $2.94\text{ N}$ ,保载时间为  $15\text{ s}$ 。为分析棒材横截面显微硬度的分布规律,每个试样从棒材边缘到中

心均匀选取 15 个测试点,相邻压痕间距为  $200\text{ }\mu\text{m}$ 。采用 ETM105D 型电子万能试验机进行拉伸性能测试,应变速率为  $1\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 棒材 R 态显微组织

图 1 为 R 态 TC16 钛合金棒材心部、 $1/2R$  及边缘部位的显微组织。由图 1 可知,工艺 I 连轧后,TC16 钛合金棒材边缘和  $1/2R$  部位的显微组织由弥散细小的  $\alpha$  相和  $\beta$  基体组成;心部的显微组织由细小等轴  $\alpha$  相、变形扭曲的长条状  $\alpha$  相和  $\beta$  基体组成。长条状  $\alpha$

相的形成机理为：在连轧过程中，虽然轧制初始温度未超过  $\beta$  相变点，但由于钛合金导热系数小，心部散热慢，导致其温升显著，温度超过  $\beta$  相变点。在随后冷却过程中，部分晶界处析出了连续的  $\alpha$  相( $\alpha_{GB}$ )，在后续轧制过程中  $\alpha_{GB}$  发生变形扭曲但未充分破碎，最终在棒材心部形成扭曲的长条状  $\alpha$  相。王田等<sup>[11]</sup>通过有限元模拟发现，Ti-811 合金棒材轧制过程中表面与心部温差可达 114 °C。类似地，张智鑫<sup>[12]</sup>通过 Deform-3D 模拟了 Ti65 合金板材轧制过程中的温度和应力分布规律，结果表明：经多道次轧制变形，当表面温度为 776 °C 时，心部温度最高可达 1000 °C；轧件表面应力大于心部应力，且沿厚度方向呈梯度减小趋势。上述研究均阐明了钛合金轧制过程中不同部位显微组织差异的形成机制。工艺 II 连轧后，棒材不同部位的显微组织基本均由弥散细小的  $\alpha$  相和  $\beta$  基体组成。这是

由于粗轧结束后在 800 °C 进行保温处理，使得 TC16 钛合金棒材各部位温度分布趋于均匀；同时，保温过程促使合金发生完全再结晶，有效降低了材料的变形抗力，进而减少后续连轧过程中因塑性变形产生的剧烈温升。在此基础上，采用 800 °C 进行后续连轧，可确保棒材心部温度始终低于  $\beta$  相变点，最终获得组织细小均匀的 TC16 钛合金棒材。工艺 III 连轧后，TC16 钛合金棒材边缘显微组织中  $\alpha$  相含量减少，部分区域  $\alpha$  相完全回溶；1/2R 处和心部则生成了大量扭曲的大尺寸  $\alpha$  相。这是由于在线感应加热温度降低，棒材温度不均匀，在热连轧过程中变形升温使得边缘部分区域温度接近  $\beta$  相变点，而 1/2R 和心部温度超过  $\beta$  相变点，形成粗大的板条组织；加之心部变形量较小，板条  $\alpha$  相虽发生扭曲变形但未充分破碎，最终形成大量扭曲的板条状  $\alpha$  相。

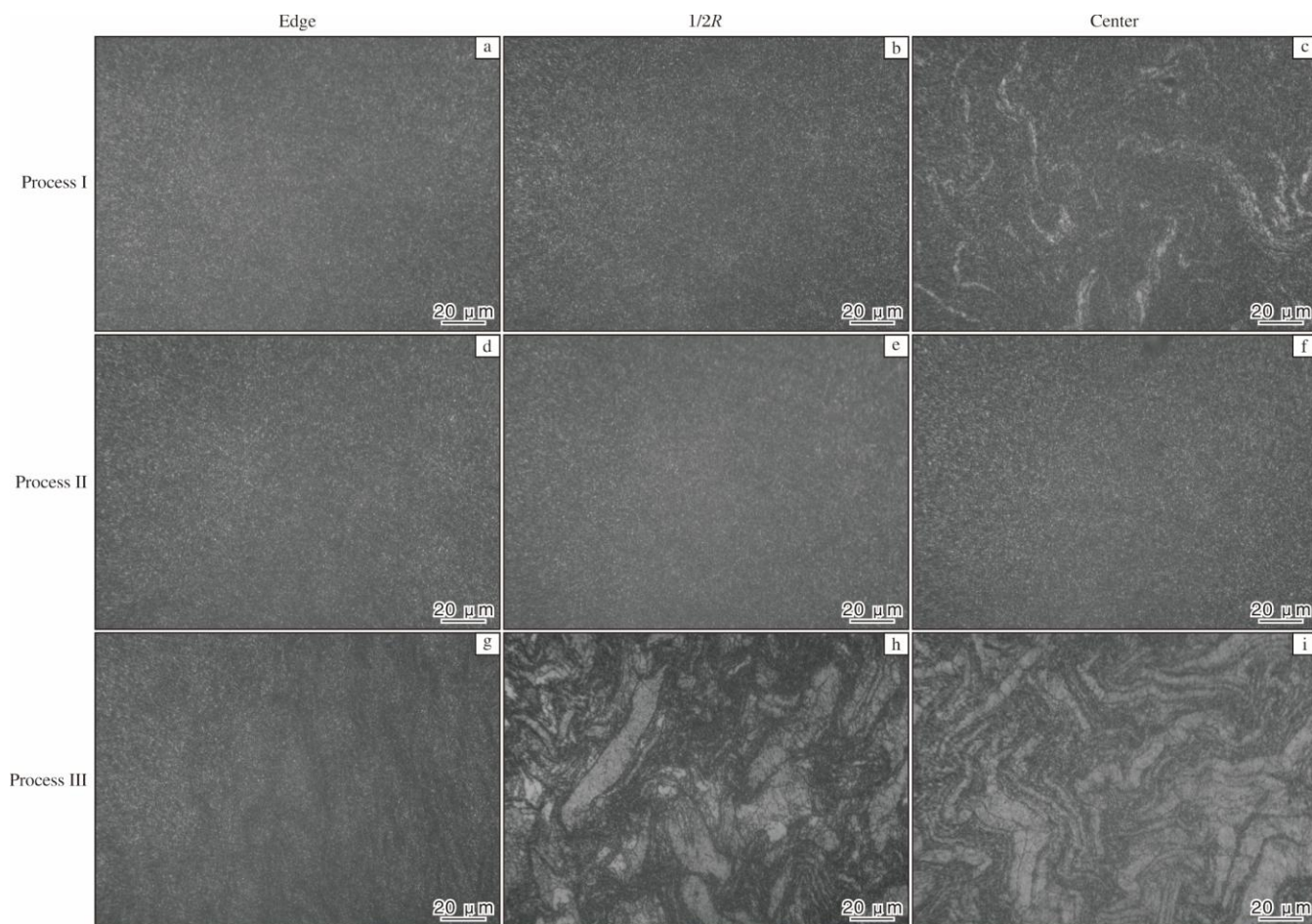


图 1 R 态 TC16 钛合金棒材不同部位的显微组织

Fig.1 Microstructures of R state TC16 titanium alloy bars at different regions: (a, d, g) edge; (b, e, h) 1/2R; (c, f, i) center

通过分析 3 组连轧工艺，发现工艺 II 的组织最为均匀细小。为揭示 TC16 钛合金棒材连轧过程中显微组织的演变规律并探究最佳连轧工艺参数，在工艺 II

的基础上进一步降低粗轧温度与回炉补温温度，制定了工艺 IV：棒材经 840 °C 粗轧至  $\phi 55$  mm 后，于 760 °C 回炉补温，再经 3 组连轧机组依次轧至  $\phi 30$  mm、

$\phi 15$  mm 和  $\phi 9$  mm, 最后风冷。不同轧制道次 TC16 钛合金棒材的显微组织见图 2。由图 2 可知, 粗轧后  $\phi 55$  mm TC16 钛合金棒材边缘显微组织由初生等轴状  $\alpha$  相、次生细针状  $\alpha$  相以及  $\beta$  基体组成; 而  $1/2R$  和心部的次生  $\alpha$  相呈短棒状和板条状。这表明边缘温度较低且冷速较快, 保留了部分初生  $\alpha$  相, 并在冷却过程中生成细针状次生  $\alpha$  相; 而心部温度较高, 初生  $\alpha$  相完全回溶, 在冷却过程中生成短棒状和板条状次生

$\alpha$  相。第一道次连轧后的  $\phi 30$  mm TC16 钛合金棒材不同位置的显微组织差别不大; 经第二道次和第三道次连轧后, 组织破碎细化,  $\alpha$  相弥散均匀分布在  $\beta$  基体上。随着轧制道次的增加,  $\alpha$  相含量明显减少, 这主要归因于连轧过程中剧烈变形导致棒材温度升高, 促使  $\alpha$  相溶解; 同时, 快速风冷抑制了次生  $\alpha$  相的析出。因此, 第三道次连轧后  $\phi 9$  mm TC16 钛合金棒材的显微组织表现为少量超细  $\alpha$  相弥散分布在  $\beta$  基体中。

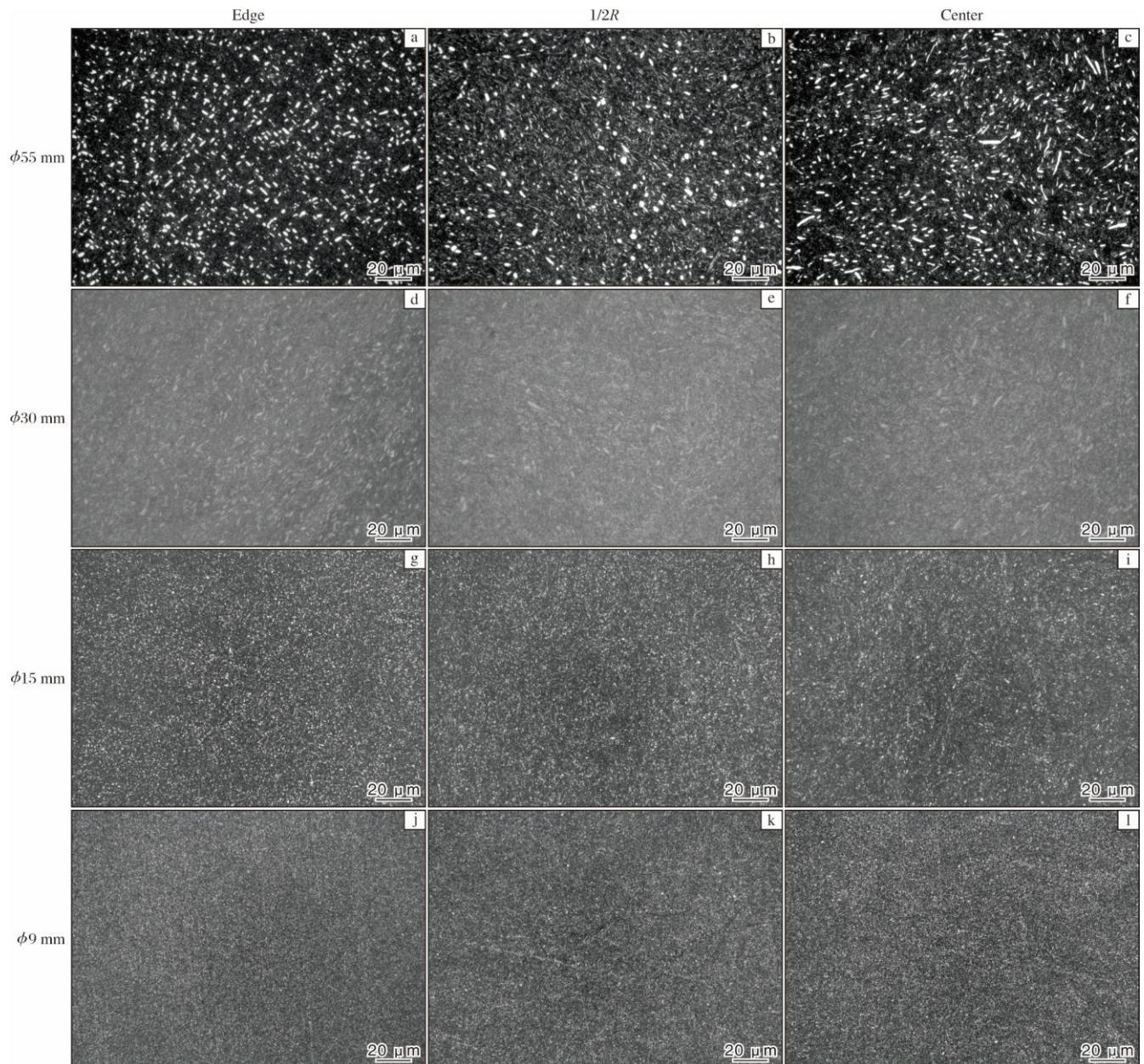


图2 不同轧制道次 TC16 钛合金棒材(R 态)的显微组织

Fig.2 Microstructures of TC16 titanium alloy bars (R state) at different rolling passes: (a–c) after rough rolling; (d–f) after the first pass; (g–i) after the second pass; (j–l) after the third pass

对比分析以上 4 种热连轧工艺可知: 工艺 I 和工艺 III 采用在线感应补温, 该加热方式下棒材截面温差大、

心部再结晶不充分, 致使心部组织扭曲拉长, 均匀性差; 工艺 II 采用炉式均热补温, 棒材截面温度均匀,

组织细小；工艺IV采用更低的粗轧温度与炉式均热补温，温度控制精准且棒材截面温差最小，随着轧制道次的增加，组织持续细化，最终获得全截面均匀的超细组织。

## 2.2 棒材 M 态显微组织与性能

M 态 TC16 钛合金棒材心部、1/2R 及边缘的显微组织如图 3 所示。由图 3 可知，工艺I制备的 TC16 钛合金棒材经退火后，边缘显微组织由细小等轴  $\alpha$  相和少量网篮组织组成，而 1/2R 和心部则为由等轴  $\alpha$  相、不规则块状  $\alpha$  相以及网篮组织构成的混合组织，这是由于轧制过程中形成的长条状  $\alpha$  相经再结晶转变为

块状  $\alpha$  相所致。工艺II制备的棒材经退火后，不同部位的显微组织均为完全再结晶的细小等轴组织。工艺III制备的 TC16 钛合金棒材经退火处理后，显微组织与工艺I类似，但心部块状  $\alpha$  相含量更高，这与 R 态棒材组织中条状  $\alpha$  相含量的分布规律基本一致。秦桂红等<sup>[7]</sup>研究发现，热连轧 TC6 钛合金棒材心部的初生  $\alpha$  相含量明显少于边缘，而次生  $\alpha$  相含量明显增多，这表明热连轧过程中心部和表面温差较大，导致心部和边缘的组织出现明显差别，且这种差异无法通过后续热处理消除。工艺IV制备的 TC16 钛合金棒材经退火后，变形位错发生回复，晶粒完全再结晶并得到细化，

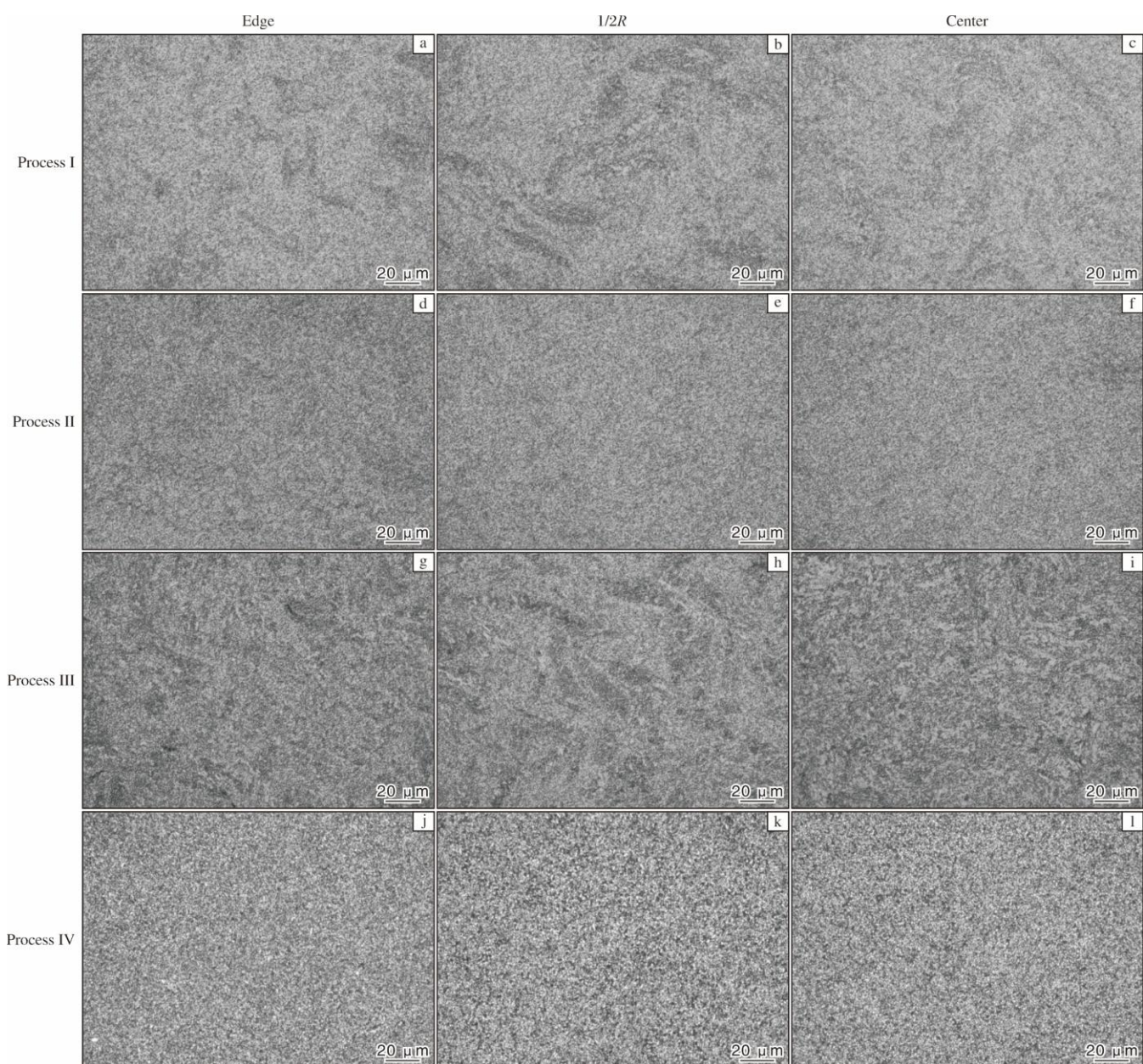


图 3 M 态 TC16 钛合金棒材不同部位的显微组织

Fig.3 Microstructures of M state TC16 titanium alloy bars at different regions: (a, d, g, j) edge; (b, e, h, k) 1/2R; (c, f, i, l) center

获得了超细等轴  $\alpha$  相均匀弥散分布于  $\beta$  基体的组织,且各部位显微组织无明显差异。

不同连轧工艺下 M 态 TC16 钛合金棒材的显微硬度分布如图 4a 所示。由图 4a 可知,工艺 I、II、III、IV 对应棒材的显微硬度平均值分别为 289、282、305、299 HV。其中,工艺 III 棒材的显微硬度值最高,工艺 II 棒材的最低。这是因为工艺 II 棒材的显微组织为等轴组织,该组织具有较低的硬度和强度<sup>[13]</sup>;而工艺 III 棒材形成了强度和硬度较高的网篮组织。值得注意的是,4 种工艺棒材不同部位的显微硬度值差异均不大,表明该连轧工艺下棒材横向不同部位的性能差异不明显。研究表明,热连轧时在  $\beta$  相区轧制易造成晶粒择优取向并形成轧制织构,加剧棒材性能各向异性;两相区轧制则促进晶粒等轴化、弱化择优取向<sup>[14-15]</sup>。本研究终轧温度均位于两相区,这进一步证实了要获得组织细小均匀、各向异性较弱的 TC16 钛合金棒材,连轧温度须设置在两相区。退火后 TC16 钛合金棒材的工程应力-应变曲线如图 4b 所示。由图 4b 可知,工艺 I 和工艺 II 棒材的拉伸性能差别不大,工艺 III 棒材的强度最高,工艺 IV 棒材次之。4 种工艺制备的棒材塑性差异不明显,相关力学性能数据见表 3。通过上述对比分析可知,工艺 II 和工艺 IV 制备的 TC16 钛合金棒材组织均十分细小均匀,但工艺 IV 制备的棒材综合力学性能更为优异。

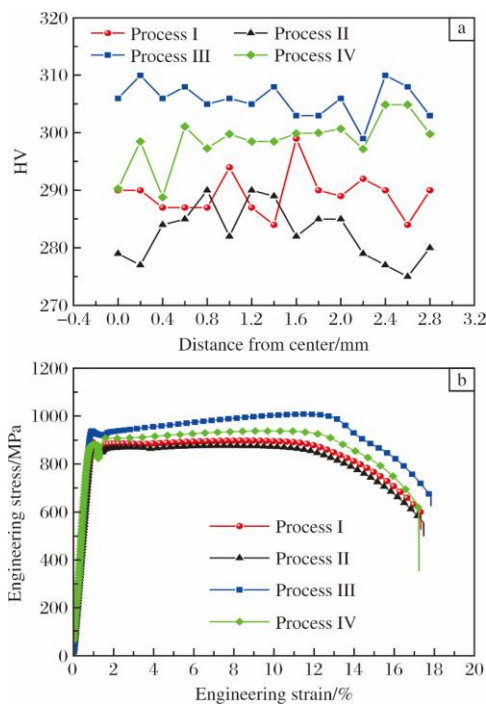


图4 M态TC16钛合金棒材的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of M state TC16 titanium alloy bars: (a) micro-Vickers hardness; (b) engineering stress-strain curves

优取向并形成轧制织构,加剧棒材性能各向异性;两相区轧制则促进晶粒等轴化、弱化择优取向<sup>[14-15]</sup>。本研究终轧温度均位于两相区,这进一步证实了要获得组织细小均匀、各向异性较弱的 TC16 钛合金棒材,连轧温度须设置在两相区。退火后 TC16 钛合金棒材的工程应力-应变曲线如图 4b 所示。由图 4b 可知,工艺 I 和工艺 II 棒材的拉伸性能差别不大,工艺 III 棒材的强度最高,工艺 IV 棒材次之。4 种工艺制备的棒材塑性差异不明显,相关力学性能数据见表 3。通过上述对比分析可知,工艺 II 和工艺 IV 制备的 TC16 钛合金棒材组织均十分细小均匀,但工艺 IV 制备的棒材综合力学性能更为优异。

表3 M态TC16钛合金棒材的硬度和拉伸性能

Table 3 Hardness and tensile properties of M state TC16 titanium alloy bars

| Process | HV  | $R_m$ /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | $A$ /% | $Z$ /% |
|---------|-----|------------|-----------------|--------|--------|
| I       | 289 | 898        | 872             | 20.5   | 61     |
| II      | 282 | 876        | 851             | 22.5   | 64     |
| III     | 305 | 1008       | 934             | 20.5   | 59     |
| IV      | 299 | 937        | 881             | 22.0   | 59     |

### 2.3 棒材 STA 态显微组织与性能

工艺 IV 制备的 TC16 钛合金棒材经固溶时效处理后的显微组织如图 5 所示。由图 5 可知,STA 态棒材组织由等轴  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织组成。与 M 态组织相比,初生  $\alpha$  相含量明显减少,这是由于在 800 °C 固溶时部分初生  $\alpha$  相发生溶解。由于组织十分细小,金相显微镜无法分辨次生  $\alpha$  相。STA 态 TC16 钛合金棒材的力学性能如图 6 所示,其硬度和拉伸性能数据见表 4。由表 4 可知,STA 态棒材的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 1163 MPa、1072 MPa 和 16.3%。结果表明,通过热连轧—退火—固溶时效工艺可获得满足标准要求的紧固件用棒材。

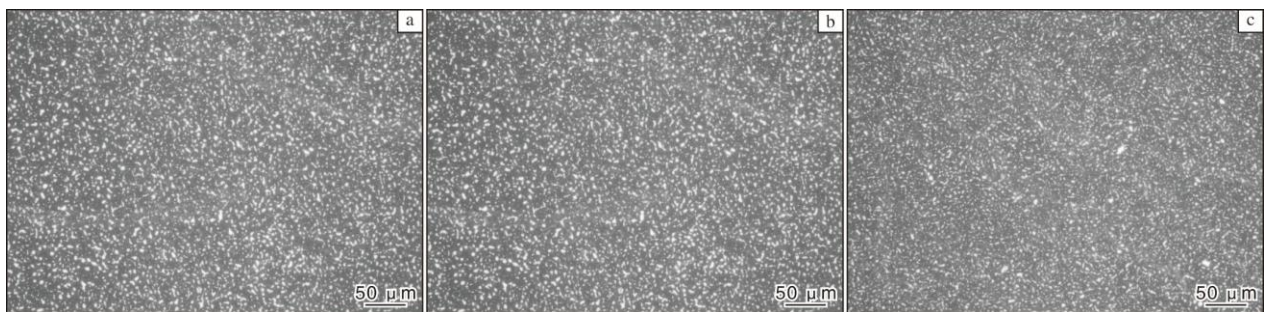


图5 STA态TC16钛合金棒材不同部位的金相组织

Fig.5 Microstructures of STA state TC16 titanium alloy bar at different regions: (a) edge; (b) 1/2R; (c) center

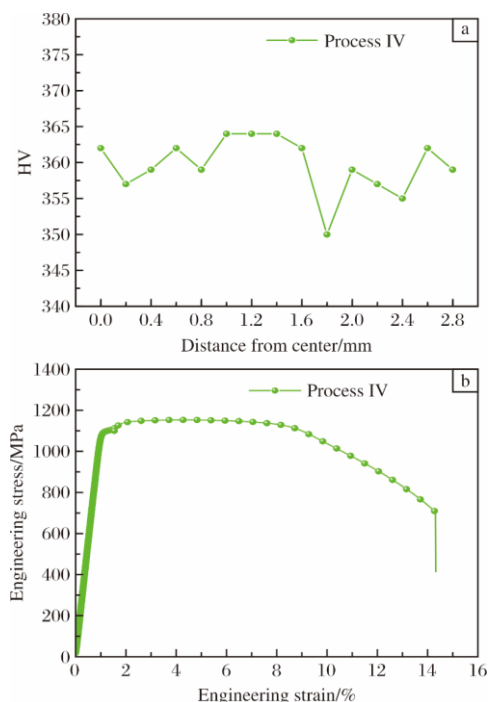


图6 STA态TC16钛合金棒材的力学性能

Fig.6 Mechanical properties of STA state TC16 titanium alloy bar: (a) micro-Vickers hardness; (b) engineering stress-strain curve

表4 STA态TC16钛合金棒材的硬度和拉伸性能

Table 4 Hardness and tensile properties of STA state TC16 titanium alloy bar

| HV  | $R_m$ /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | $A$ /% | $Z$ /% |
|-----|------------|-----------------|--------|--------|
| 360 | 1163       | 1072            | 16.3   | 55     |

### 3 结 论

(1) 热连轧过程中, TC16 钛合金棒材对轧制温度较为敏感, 不同部位的变形量与温度存在差异, 导致组织呈现明显的区域性分布特征。

(2) 工艺IV连轧过程中, 随着轧制道次增加, 初生  $\alpha$  相含量显著降低, 组织明显细化, 棒材横截面不同部位的组织差异大幅减弱, 等轴  $\alpha$  相在  $\beta$  基体中呈均匀弥散分布。

(3) 连轧过程中不同部位产生的显微组织差异无法通过热处理完全消除。工艺IV制备的 TC16 钛合金棒材 M 态显微组织为超细等轴  $\alpha$  相弥散、均匀地分布于  $\beta$  基体中, 且各部位的显微组织差异不明显, 其显微硬度与拉伸强度均优于工艺I和工艺II制备的 TC16 钛合金棒材。

(4) TC16 钛合金棒材 STA 态显微组织由细小的等轴  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织组成, 平均显微硬度为 360 HV, 较 M 态提高了 20.4%。STA 态棒材的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 1163 MPa、1072 MPa 和 16.3%。通过热连轧—退火—固溶时效工艺, 最终获得了满足标准要求的紧固件用棒材。

### 参考文献 References

- [1] 李蒙, 凤伟中, 关蕾, 等. 航空航天紧固件用钛合金材料综述[J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(4): 49-53.
- [2] 徐照英, 苏永要, 张腾飞, 等. 钛合金紧固件表面掺钛类金刚石薄膜的微观结构和磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(4): 993-1001.
- [3] 解文卓, 张佼, 周亮. 紧固件用 TC16 钛合金丝材加热温度对组织性能影响[J]. 世界有色金属, 2018(23): 6-8.
- [4] 李峰丽, 张明玉, 于成泉, 等. 冷却方式对 TC16 钛合金丝材组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(11): 57-65.
- [5] 李英浩, 贺飞, 侯峰起, 等. 热处理对 TC16 钛合金棒材显微组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2014, 31(4): 20-23.
- [6] 朱峰, 计波, 朱益藩, 等. TC4 钛合金棒材热连轧工艺研究[C]//第十三届全国钛及钛合金学术交流会论文集. 洛阳: 中国有色金属学会, 2008: 277-279.
- [7] 秦桂红, 计波, 朱益藩. TC6 钛合金棒材的热连轧工艺的研究[C]//第 5 届中国金属学会青年学术年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2010: 106-109.
- [8] 孙虎代, 陶海林, 黄帆, 等. 轧制方式对 TC16 钛合金线材组织和性能的影响[J]. 锻造与冲压, 2023(15): 47-51.
- [9] 侯峰起, 胡彬, 孙小平, 等. 显微组织对 TC16 钛合金棒线材冷锻成形性能的影响[J]. 钛工业进展, 2017, 34(5): 18-21.
- [10] 刘志强, 张青来, 韩伟东, 等. TC16 钛合金板材冷轧工艺及组织性能研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 20-24.
- [11] 王田, 南迎飞, 王伟, 等. Ti-811 合金棒材热连轧过程有限元数值模拟及验证[J]. 钛工业进展, 2023, 40(4): 26-34.
- [12] 张智鑫. Ti65 合金薄板轧制成形及其组织力学性能关系[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
- [13] 解文卓. 紧固件用 TC16 钛合金丝材组织与性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [14] 孙小平, 刘东, 杜予珏, 等. 轧制-拉拔-退火冷却协同调控下 Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金组织与组织演变机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2026, 55(2): 535-542.
- [15] 王勤波, 万璐欣, 蒲超博, 等. 不同初始组织 TC4 钛合金在两相区热变形中的组织演变[J]. 钛工业进展, 2026, 43(2): 7-15.