

# 航空用超大规格 TC18 钛合金棒材的制备及组织性能研究

任晓龙, 陈宇, 张胜, 杨晶, 王涛, 赵宁

(西部超导材料科技股份有限公司 特种钛合金材料制备技术国家地方联合工程实验室  
西安市特种钛合金制备及仿真技术重点实验室, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 经3次真空自耗电弧熔炼得到规格为  $\phi 720$  mm 的 TC18 钛合金铸锭, 再经 80 MN 快锻机开坯锻造和多道次墩拔锻造, 成功制备了航空用  $\phi 500$  mm 超大规格棒材, 并对其组织均匀性及力学性能稳定性进行了评价分析。结果表明: TC18 钛合金铸锭头、中、尾不同部位的主元素极差在 0.1% 以内, 成分均匀性良好; TC18 钛合金棒材不同部位的低倍组织均匀模糊, 高倍组织呈现出典型的双态组织, 且组织均匀一致性良好; 棒材不同部位的力学性能差异较小, 具有良好的性能稳定性。

**关键词:** TC18 钛合金; 超大规格棒材; 化学成分; 组织; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)03-014-05

## Study on Preparation, Microstructure and Mechanical Properties of Oversized TC18 Titanium Alloy Bar for Aviation

Ren Xiaolong, Chen Yu, Zhang Sheng, Yang Jing, Wang Tao, Zhao Ning

(Western Superconducting Technologies Co., Ltd., National & Local Joint Engineering Laboratory for Special Titanium Alloy Processing Technologies, Xi'an Key Laboratory of Special Titanium Alloy Processing and Simulation Technologies, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** The TC18 titanium alloy ingot with diameter of 720 mm was prepared by three times vacuum consumable arc melting. The oversized  $\phi 500$  mm TC18 titanium alloy bar for aviation was successfully prepared by 80 MN rapid forging machine via cogging, multiple pass upsetting and drawing. The uniformity of microstructure and the stability of mechanical properties were evaluated and analyzed. The results show that the range of main elements at different positions of TC18 titanium alloy ingot is less than 0.1% indicating well composition uniformity. The macrostructure of TC18 titanium alloy bar at different positions is uniform and fuzzy, and the microstructure presents a typical bimodal microstructure with good uniformity. The mechanical properties of the bar at different positions show well consistency and performance stability.

**Keywords:** TC18 titanium alloy; oversized bar; chemical composition; microstructure; mechanical property

钛及钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性好等优良性能, 在航空航天、汽车、生物医疗等领域展现出极强的发展潜力<sup>[1-5]</sup>。TC18 钛合金是一种典型的高强度高韧钛合金, 名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe, 大量用作飞机起落架、飞机承重梁等大型承力结构件<sup>[6-14]</sup>。

随着航空工业的发展, 新型飞机对承力结构件的要求逐渐向整体化、大型化方向发展, 对原材料的尺寸要

求也进一步提高<sup>[15-17]</sup>。颜孟奇等人<sup>[18]</sup>探究了热处理参数对  $\phi 300$  mm TC18 钛合金棒材组织的影响; 乔恩利等人<sup>[19]</sup>对比了3种不同锻造工艺对  $\phi 400$  mm TC18 钛合金棒材组织与性能的影响, 进而得出最优锻造工艺; 顾忠明等人<sup>[20]</sup>研究了  $\phi 400$  mm TC18 钛合金棒材组织与力学性能的对对应关系。但对于更大规格 TC18 钛合金棒材的研究鲜有报道, 这是由于超大规格棒材的组织均匀性与力学性能稳定性难以控制。

为此, 开展了  $\phi 500$  mm TC18 钛合金棒材的研制工作, 以期获得成分、组织、性能满足航空标准要求的超大规格 TC18 钛合金棒材, 为高强度高韧钛合金大型化发展奠定技术基础。

收稿日期: 2024-02-18

基金项目: 秦创原引用高层次创新创业人才项目 (QCYRCXM-2023-003)

通信作者: 任晓龙 (1989—), 男, 工程师。

## 1 实验

选用高纯海绵钛和 MoAl、VAl、CrAl、FeAl 中间合金, 经 3 次真空自耗电弧熔炼制备规格为  $\phi 720$  mm 的 TC18 钛合金铸锭。铸锭质量为 5250 kg, 通过金相法测得铸锭相变点为 870~875 °C。在铸锭头部、中部、尾部 3 个部位取样, 进行化学成分分析。

铸锭经 80 MN 快锻机在相变点以上开坯锻造, 对粗大的铸态组织进行充分破碎, 通过多道次的锻拔锻造进一步细化晶粒, 最终在  $\alpha+\beta$  相区锻造成  $\phi 500$  mm TC18 钛合金棒材。TC18 钛合金棒材单根质量超过 2500 kg, 实物如图 1 所示。



图 1 超大规格 TC18 钛合金棒材照片

Fig.1 Photo of oversized TC18 titanium alloy bar

为了对棒材的组织均匀性进行评价, 在棒材的头、尾区域各切取一个 35 mm 厚试样片进行热处理, 热处理

制度为 835 °C 保温 2 h, 炉冷到 750 °C, 保温 2 h 后空冷, 后续在 615 °C 时效 6 h 后空冷。对热处理后的试样片进行低倍组织观察, 在试样片的边部、R/2、心部切取 15 mm × 15 mm × 10 mm 的金相试样, 使用 240#、400#、1000#、2000# 砂纸依次打磨, 抛光后使用配比为 3%HF + 7%HNO<sub>3</sub> + 90%H<sub>2</sub>O (体积比) 的腐蚀液进行蚀刻。采用 Olympus GX71 光学显微镜 (OM)、JSM-IT700HR 扫描电子显微镜 (SEM) 观察棒材不同部位的微观组织。

为了对 TC18 钛合金棒材力学性能的稳定性进行评价, 在热处理后试样片 R/2 处取样, 根据 GB/T 228.1—2021 标准加工成  $\phi 5$  mm 拉伸试样, 采用 ZWICK 万能材料拉伸试验机进行室温拉伸性能测试; 根据 GB/T 229—2007 标准加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 冲击试样, 采用 ZWICK 300J 摆锤冲击试验机进行室温冲击性能测试; 根据 GB/T 4161—2007 标准加工成 62.5 mm × 60 mm × 25 mm 冲击试样, 采用 MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机进行室温断裂韧性测试。为确保实验数据准确、可信, 每组拉伸试验取 3 个平行试样进行测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 铸锭成分均匀性

表 1 为 TC18 钛合金铸锭头部、中部、尾部 3 个部位的化学成分分析结果。由表 1 可以看出, TC18 钛合金铸锭的主元素 Al、Mo、V、Cr 和 Fe 的极差分别为 0.03%、

表 1 TC18 钛合金铸锭的化学成分 (w%)

Table 1 Chemical compositions of TC18 titanium alloy ingot

Position	Ti	Al	Mo	V	Cr	Fe	Si	Zr	C	N	O	H
Top	Bal.	5.30	5.03	5.13	1.09	0.96	0.013	0.01	0.013	0.005	0.109	0.0022
Middle	Bal.	5.29	4.96	5.12	1.13	0.98	0.011	0.01	0.012	0.004	0.106	0.0015
Tail	Bal.	5.32	4.99	5.09	1.12	0.97	0.012	0.01	0.011	0.005	0.112	0.0014
Range	—	0.03	0.07	0.04	0.04	0.02	0.002	0	0.002	0.001	0.006	0.0008

0.07%、0.04%、0.02%, 杂质元素 O 的极差仅有 0.006%, 表明铸锭整体成分均匀性良好。

### 2.2 棒材组织

#### 2.2.1 棒材宏观组织

图 2 为 TC18 钛合金棒材低倍组织照片。由图 2 可见, 棒材头、尾低倍组织无明显分层、裂纹、气孔、偏析、金属和非金属夹杂及其他肉眼可见的冶金缺陷; 无肉眼可见的清晰晶粒, 低倍组织均匀模糊。

#### 2.2.2 棒材显微组织

图 3 为 TC18 钛合金棒材不同部位的金相照片, 图

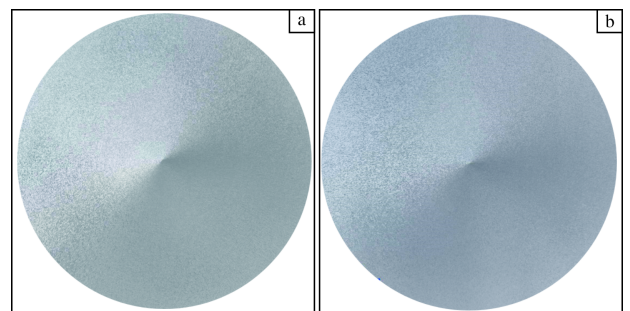


图 2 TC18 钛合金棒材低倍组织照片

Fig.2 Macrostructures of TC18 titanium alloy bar: (a) head; (b) tail

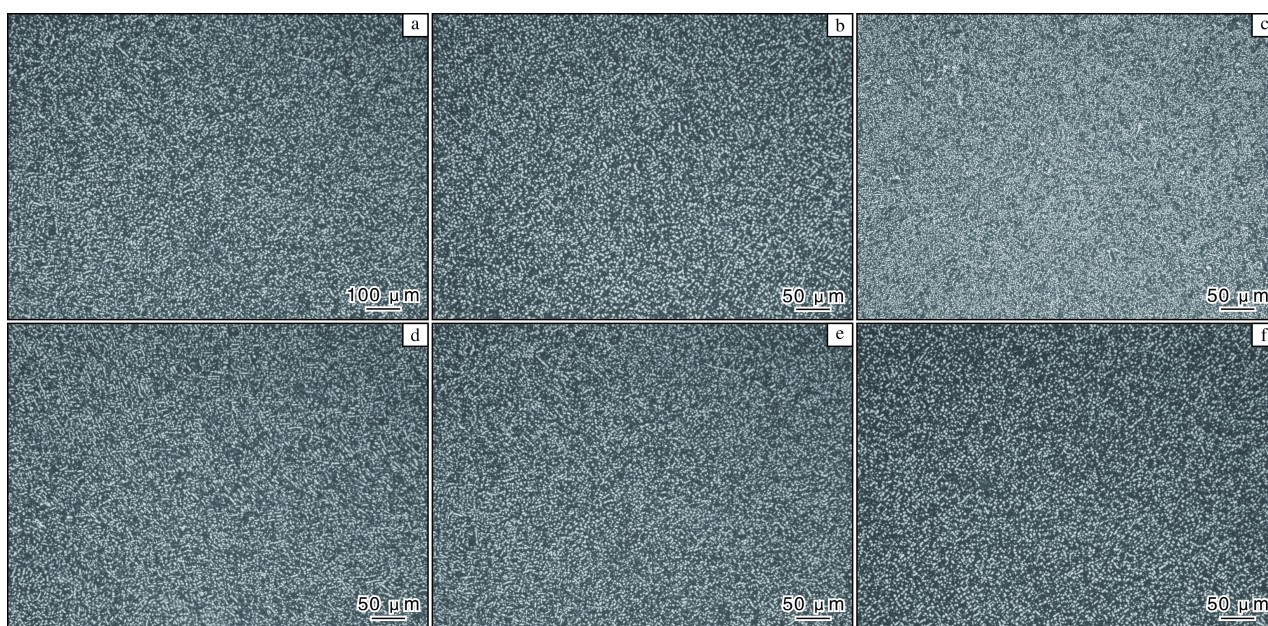


图3 TC18钛合金棒材不同部位的金相照片

Fig.3 OM images of TC18 titanium alloy bar at different positions: (a) head-edge; (b) head-R/2; (c) head-center; (d) tail-edge; (e) tail-R/2; (f) tail-center

中白色的物相为 $\alpha$ -Ti相,黑色的物相为 $\beta$ -Ti相。由图3可知,TC18钛合金棒材组织均由 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相组成, $\alpha$ 相在 $\beta$ 相中均匀分布,无明显分层、团聚现象。对比棒材头部和尾部不同部位的微观组织,无明显区别,说明棒材整体的组织均匀性良好。

图4为TC18钛合金棒材头部、尾部不同部位的SEM照片。由图4可知,TC18钛合金棒材的微观组织主要由近等轴的初生 $\alpha$ 相、细针状的次生 $\alpha$ 相以及分布在 $\alpha$ 相之间的 $\beta$ 基体组成,组织分布均匀,无明显团聚、分层现象。

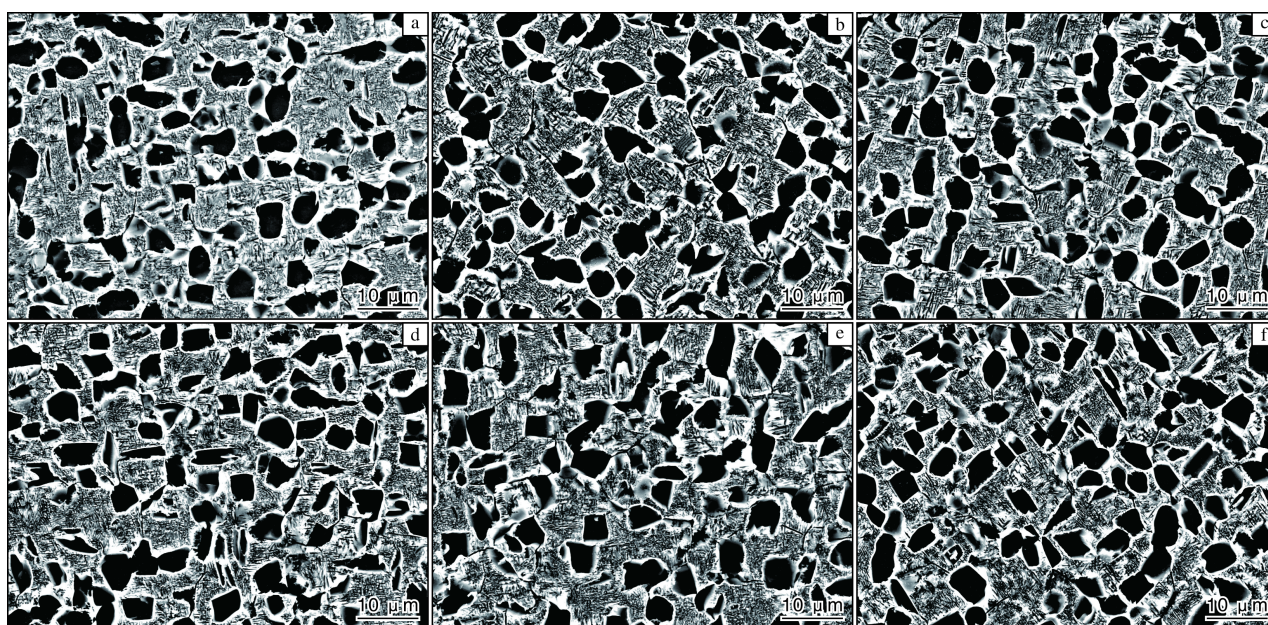


图4 TC18钛合金棒材不同部位的SEM照片

Fig.4 SEM images of TC18 titanium alloy bar at different positions: (a) head-edge; (b) head-R/2; (c) head-center; (d) tail-edge; (e) tail-R/2; (f) tail-center

为对比 TC18 钛合金棒材不同部位的微观组织, 使用 Image J 软件对不同部位初生  $\alpha$  相的平均晶粒尺寸进行统计, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, TC18 钛合金棒材头与尾的边部、R/2 和心部初生  $\alpha$  相的晶粒尺寸较为接近, 最大为 4.12  $\mu\text{m}$ , 最小为 3.94  $\mu\text{m}$ , 极差仅为 0.18  $\mu\text{m}$ , 说明棒材整体的组织均匀性良好。

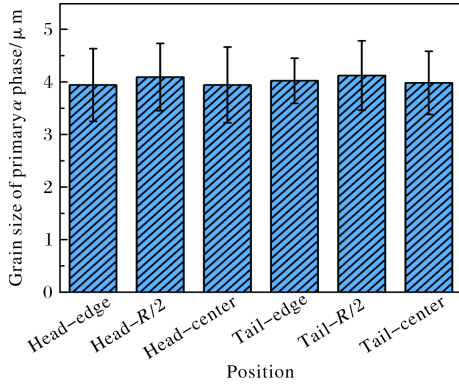


图 5 TC18 钛合金棒材不同部位的初生  $\alpha$  相晶粒尺寸  
Fig.5 Grain size of primary  $\alpha$  phase at different positions of TC18 titanium alloy bar

通过 Image J 软件对棒材不同部位初生  $\alpha$  相、次生  $\alpha$  相和  $\beta$  相的体积分数进行统计, 结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, TC18 钛合金棒材头部和尾部的物相分布接近, 极差不超过 3%。对比边部、R/2 和心部的物相体积分数, 初生  $\alpha$  相、次生  $\alpha$  相和  $\beta$  相的含量相近, 无明显区别, 棒材整体的组织均匀性良好。

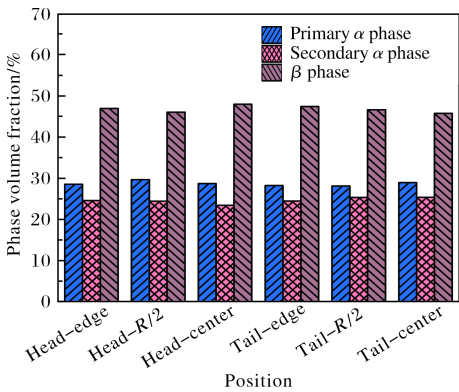


图 6 TC18 钛合金棒材不同部位的物相体积分数  
Fig.6 Volume fraction of different phases of TC18 titanium alloy bar at different positions

### 2.3 棒材力学性能

对 TC18 钛合金棒材头部与尾部的边部、R/2、心部区域的室温拉伸性能、冲击性能以及断裂韧性进行测试, 对比不同部位的力学性能, 进而对棒材整体的性能稳定性进行分析。图 7 为 TC18 钛合金棒材的室温拉伸测试结果。由图 7 可见, 棒材不同部位的室温拉伸性能较为接近, 抗

拉强度最大为 1115 MPa, 最小为 1104 MPa, 极差为 11 MPa; 屈服强度最大为 1057 MPa, 最小为 1047 MPa, 极差为 10 MPa; 延伸率最大为 13%, 最小为 11%, 极差为 2%; 断面收缩率最大为 32%, 最小为 26%, 极差为 6%, 棒材整体的性能稳定性较好。

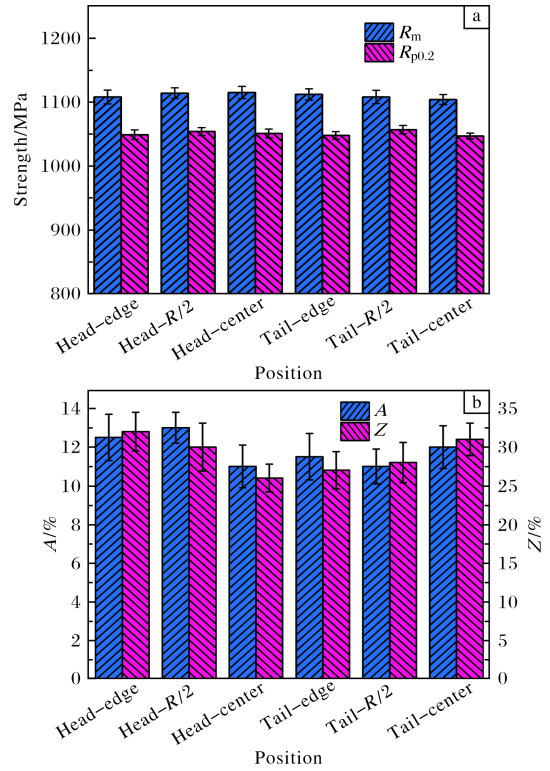


图 7 TC18 钛合金棒材不同部位的室温拉伸性能  
Fig.7 Room temperature tensile properties of TC18 titanium alloy bar at different positions: (a) tensile strength; (b) tensile plasticity

图 8 为 TC18 钛合金棒材不同部位的冲击韧性和断裂韧性测试结果。由图 8 可知, 棒材头部和尾部的不同区域韧性测试结果相近, 冲击吸收能量 ( $KU_2$ ) 的范围

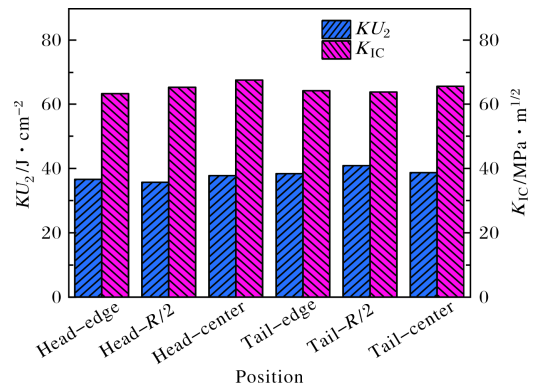


图 8 TC18 钛合金棒材不同部位的冲击性能和断裂韧性  
Fig.8 Impact and fracture toughness of TC18 titanium alloy bar at different positions

为 35.7~40.9 J/cm<sup>2</sup>, 头部与尾部偏差仅为 5.2 J/cm<sup>2</sup>, 断裂韧性值 ( $K_{IC}$ ) 的范围为 63.3~67.5 MPa·m<sup>1/2</sup>, 头部与尾部偏差仅为 4.2 MPa·m<sup>1/2</sup>, 棒材整体的性能稳定性较好。

### 3 结论

(1) TC18 钛合金铸锭不同部位的成分均匀性良好, 各主元素极差控制在 0.1% 以内。

(2)  $\phi 500$  mm 超大规格 TC18 钛合金棒材头、尾的低倍组织均匀一致, 不同部位的微观组织无明显差异, 说明棒材整体组织均匀性良好。

(3)  $\phi 500$  mm 超大规格 TC18 钛合金棒材不同部位的力学性能接近, 无明显差异, 性能稳定性较好。

#### 参考文献 References

- [1] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.
- [2] 刘超, 孔祥吉, 吴胜文, 等. 钛及钛合金金属粉末注射成型技术的研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2017, 35(2): 150-158.
- [3] 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.
- [4] 赵丹丹. 钛合金在航空领域的发展与应用[J]. 铸造, 2014, 63(11): 1114-1117.
- [5] 辛社伟, 刘向宏, 张思远, 等. 钛合金低成本化技术的研究与发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(11): 3971-3980.
- [6] 官杰, 刘建荣, 雷家峰, 等. TC18 钛合金的组织与性能与热处理制度的关系[J]. 材料研究学报, 2009, 23(1): 77-82.
- [7] Liu C M, Tian X J, Tang H B, et al. Microstructural characterization of laser melting deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe near  $\beta$  titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 572: 17-24.
- [8] 张亚峰, 卢晓通, 刘汉源, 等. 浅析航空用高强 TA18 钛合金管材组织和性能影响因素[J]. 钛工业进展, 2023, 40(6): 41-48.
- [9] Liu S F, Li M Q, Luo J, et al. Deformation behavior in the isothermal compression of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 589: 15-22.
- [10] 张静, 牛伟鹏, 张延珍. TC18 大型自由锻件准  $\beta$  锻造变形过程控制[J]. 锻造与冲压, 2022(5): 20-22+24.
- [11] 熊智豪, 李志尚, 杨平, 等. 大规格 TC18 钛合金棒材多次火次锻造中  $\beta$  相织构演变规律[J]. 钛工业进展, 2021, 38(6): 6-11.
- [12] Klimova M, Zherebtsov S, Salishchev G, et al. Influence of deformation on the Burgers orientation relationship between the  $\alpha$  and  $\beta$  phases in Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 645: 292-297.
- [13] 辛宏靖, 廖敏茜, 王潇汉, 等. 初生  $\alpha$  相含量对 TC18 时效组织及力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 143-147.
- [14] 郭小汝, 张俊喜, 易湘斌, 等. 次生  $\alpha$  相含量对 TC18 钛合金动态压缩性能和绝热剪切敏感性的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(10): 24-30.
- [15] 张方, 王林岐, 赵松. 航空钛合金锻造技术的研究进展[J]. 锻压技术, 2017, 42(6): 1-7.
- [16] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006(6): 850-856.
- [17] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- [18] 颜孟奇, 陈立全, 杨平, 等. 热变形参数对 TC18 钛合金  $\beta$  相组织及织构演变规律的影响[J]. 金属学报, 2021, 57(7): 880-890.
- [19] 乔恩利, 冯永琦, 李渭清, 等. TC18 钛合金大规格棒材锻造工艺[J]. 金属世界, 2013(4): 54-55+72.
- [20] 顾忠明, 张起, 乔恩利, 等. 大规格 TC18 钛合金棒材组织与力学性能的研究[J]. 湖南有色金属, 2023, 39(1): 43-45+79.

#### 专利信息

## 热处理固溶耦合强化近 $\alpha$ 钛基复合材料及其制备方法

申请号: CN202410022128.1

申请日: 2024-01-08

公开(公告)日: 2024-04-05

公开(公告)号: CN117821871A

申请(专利权)人: 西安稀有金属材料研究院有限公司

**摘要:** 本发明公开了一种热处理固溶耦合强化近  $\alpha$  钛基复合材料及其制备方法, 该方法包括: (1) 将近  $\alpha$  钛基粉体与炭黑粉末、TaC 和 NbC 陶瓷粉末球磨混合; (2) 放电等离子体烧结; (3) 高温固溶热处理并淬火; (4) 时效热处理并冷却; (5) 热轧。使用  $\alpha$ -Ti 稳定元素 C 和  $\beta$ -Ti 稳定元素 Ta、Nb 作为添加元素, 配合采用高温固溶热处理及时效热处理工艺, 通过调节增强相的尺寸、形貌和分布实现各部分之间的耦合强化, 提高钛合金基体的强度, 改善钛合金基体和陶瓷相的物理相容性, 从而提高近  $\alpha$  钛基复合材料的力学性能。