

# 热处理对 TA34 钛合金管材组织性能与成材率的影响

李婷<sup>1</sup>, 杜宇<sup>2</sup>, 屈磊<sup>1</sup>, 郭荻子<sup>1</sup>, 应扬<sup>1</sup>, 孙花梅<sup>1</sup>, 邹磊<sup>1</sup>

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西安秦钛智造科技有限公司, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 研究了热处理对 TA34 钛合金管材显微组织、力学性能及成材率的影响。结果表明, TA34 钛合金管材冷加工态组织为细小模糊晶, 纵截面呈现金属流线; 经道次间普通退火 + 成品等温分级退火(T1 制度)处理后, 组织形貌为等轴  $\alpha$  相, 晶粒平均尺寸约为 12  $\mu\text{m}$ ; 经道次间普通退火 + 最后一道次轧制前等温分级退火 + 成品普通退火(T2 制度)处理后, 组织形貌为等轴  $\alpha$  相伴随有少量变形的片状  $\alpha$  相, 晶粒尺寸为 12 ~ 18  $\mu\text{m}$ 。经不同热处理获得的管材在 293、77、20 K 的测试温度下强度相当, 且强度均随着测试温度的降低而上升; T1 制度下管材的塑性随着测试温度的降低下降不明显, 其塑性明显优于 T2 制度管材; T2 制度管材的成材率为 44.9%, 相比 T1 制度(成材率为 39.5%)提高 5.4%。

**关键词:** TA34 钛合金; 管材; 热处理; 低温性能; 成材率

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)05-022-05

## Effect of Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Yield of TA34 Titanium Alloy Tubes

Li Ting<sup>1</sup>, Du Yu<sup>2</sup>, Qu Lei<sup>1</sup>, Guo Dizi<sup>1</sup>, Ying Yang<sup>1</sup>, Sun Huamei<sup>1</sup>, Zou Lei<sup>1</sup>

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

(2. Xi'an QinTi Intelligent Manufacturing Technologies Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The effects of heat treatment on microstructure, mechanical properties and yield of TA34 titanium alloy tubes were studied. The results show that the microstructure of TA34 titanium alloy tubes in the cold-worked state is fine fuzzy crystals, and the longitudinal section presents metal streamlines; the microstructure of the tubes treated by ordinary annealing + isothermal grades annealing (T1) is equiaxed  $\alpha$  phase, and the average grain size is about 12  $\mu\text{m}$ ; while treated by ordinary annealing + isothermal grades annealing + ordinary annealing (T2) is equiaxed  $\alpha$  phase accompanied with a small amount of deformed lamellar  $\alpha$  phase, which grain size varies from 12  $\mu\text{m}$  to 18  $\mu\text{m}$ . The tensile strength of the tubes obtained by different heat treatments at the test temperatures of 293, 77 and 20 K are equivalent, and the tensile strength of the tubes all increase with the decrease of the test temperature; the plasticity of the tubes with T1 treatment does not decrease significantly with the decrease of the test temperature, and obviously better than T2 treatment; the yield of T2 heat treatment is 44.9%, which is 5.4% higher than that of T1 treatment (yield is 39.5%).

**Key words:** TA34 titanium alloy; tubes; heat treatment; low temperature performance; yield

TA34 钛合金是西北有色金属研究院研制的一种用于 20 K 液氢环境下的低温钛合金, 该合金兼具传

统钛合金比强度高、耐腐蚀性能好、热导率低、无磁性等特性, 同时具有良好的冷成形性能、焊接性能及加工性能, 可制备成管材及复杂结构件<sup>[1-2]</sup>。目前, 采用 TA34 钛合金制备的管材已成功应用于某型航天发动机液氢管路系统中。

钛合金管材通常采用挤压 + 轧制的方式制备, 可获得均匀细小的组织, 有利于合金强度与塑性的

收稿日期: 2022-07-26

基金项目: 陕西省科技重大专项(2020ZDZX04-01-02); 陕西省重点研发计划项目(2022GY-217); 西安市未央区科技计划项目(202108)

通信作者: 李婷(1988—), 女, 工程师。

提高<sup>[3-5]</sup>。但同时也因为中间加工工序较多,成材率相对板材、棒材较低,均需在轧制每道次间进行退火处理,以消除管材内应力,避免后续管材轧制过程中发生开裂。此外,薄壁管材进行热处理时,为防止出现黏连、塌陷,一般采用吊装的方式放置管材。TA34 钛合金属于近 $\alpha$ 型钛合金,为获得优异的强塑性匹配,通常采用等温分级退火处理。但等温分级退火制度退火温度高、保温时间长,管材吊装端发生软化变形的区域较大<sup>[6]</sup>。本研究通过调整轧制道次间的热处理制度及成品管材热处理制度,旨在获得力学性能满足 GJB 9583—2018 要求的成品管材,为后续 TA34 钛合金管材批量化生产提供合理的热处理制度。

## 1 实 验

选用 0 级小颗粒海绵钛、海绵锆、铝豆及铝钼合金等原料,按合金配比包制合金包并压制电极,通过 3 次真空自耗电弧炉熔炼制备 TA34 钛合金铸锭。铸锭相变点为 $(940 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,化学成分满足 GB/T 3620.1—2016 要求。铸锭经扒皮、探伤、去冒口后,采用多火次、大变形量进行墩拔锻造,获得棒坯。棒坯经扒皮、钻孔后制备成挤压管坯,再经挤压和多道次轧制制备成规格为 $\phi 85 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times (2000 \sim 4000) \text{ mm}$ 的成品管材,轧制道次间均需进行退火处理。

对 TA34 钛合金管材进行 2 种制度的热处理: T1 制度,道次间普通退火 + 成品等温分级退火处理; T2 制度,道次间普通退火 + 最后一道次轧制前等温分级退火 + 成品普通退火处理。普通退火制度为相变点以下  $200 \sim 300^\circ\text{C}$  保温  $60 \sim 90 \text{ min}$ ,空冷至室温;等温分级退火制度为相变点以下  $20 \sim 50^\circ\text{C}$  保温  $30 \sim 60 \text{ min}$ ,炉冷至相变点以下  $100 \sim 200^\circ\text{C}$  保温  $30 \sim 60 \text{ min}$ ,炉冷至相变点以下  $200 \sim 300^\circ\text{C}$  保温  $30 \sim 60 \text{ min}$ ,随后炉冷至  $200^\circ\text{C}$  出炉。

从热处理前后的 TA34 钛合金管材上沿纵剖面切取尺寸为  $2.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的金相试样,采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜(OM)进行显微组织观察。从热处理后的 TA34 钛合金管材上切取室温、低温拉伸试样,其中室温拉伸试样采用 GB/T 228.1—2010 中的 S4 试样,在 Instron 1185 万能拉伸试验机上进行测试,低温拉伸试样采用定标小试样,在 UTM4204 电子万能试验机上进行测试。每组拉伸试验测量 2 个试样,取平均值作为测试结果。从不

同温度拉伸试样断口附近沿纵剖面切取金相试样,采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜分析显微组织。采用精度分别为  $0.02$ 、 $0.01 \text{ mm}$  的卡尺和内径百分表测量管材尺寸。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织

#### 2.1.1 冷加工态组织

图 1 为不同制度冷加工态 TA34 钛合金成品管材纵剖面的显微组织。经冷轧加工后,管材组织为细小模糊晶,沿冷轧方向呈现金属流线。在轧制道次间进行普通退火的成品管材,冷加工后金属流线更加明显;而在轧制道次间进行普通退火处理,在成品轧制前进行等温分级退火处理的管材其组织更加均匀,金属流线较弱。

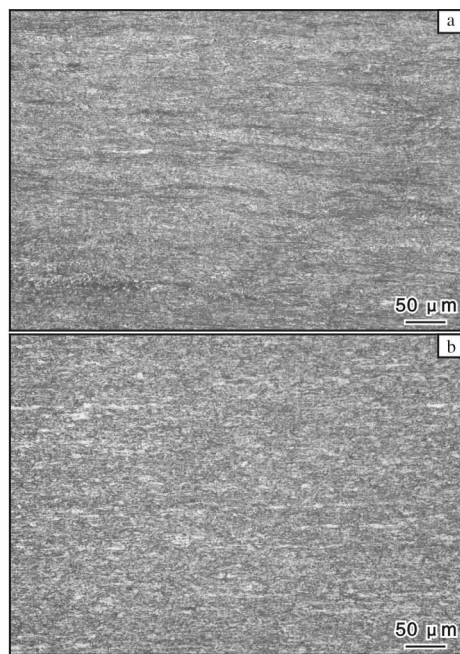


图 1 不同制度 TA34 钛合金成品管材冷加工态的显微组织

Fig. 1 Microstructures of TA34 titanium alloy tubes in cold working state after different treatments: (a) T1; (b) T2

#### 2.1.2 热处理态组织

图 2 为不同制度 TA34 钛合金管材经热处理后纵剖面的显微组织。管材经多道次轧制变形加工,原始组织被充分破碎,对成品管材进行等温分级退火处理,由于温度梯度多、保温时间较长,组织回复、再结晶进行得比较充分,成品管材呈现出均匀细小的等轴 $\alpha$ 相,晶粒平均尺寸约为  $12 \mu\text{m}$ ;而在成品

管材最后一道次轧制前先进行等温分级退火处理, 轧制后进行普通退火处理, 由于退火温度低、保温时间短, 使得回复、再结晶进行得不充分, 致使成

品管材退火后保留一定的轧制变形组织, 成品管材组织形貌为等轴  $\alpha$  相伴随少量的变形片状  $\alpha$  相, 晶粒尺寸为  $12 \sim 18 \mu\text{m}$ 。

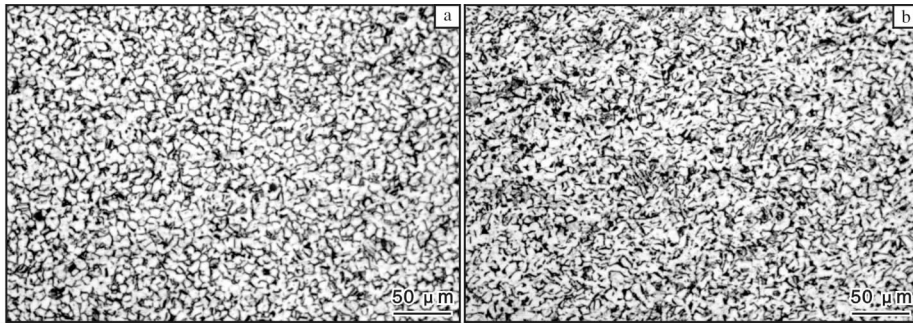


图2 不同制度 TA34 钛合金管材热处理后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TA34 titanium alloy tubes after different heat treatments: (a) T1; (b) T2

### 2.1.3 拉伸断裂后组织

经不同制度热处理的 TA34 钛合金管材在 293、77、20 K 进行拉伸试验, 试样断口附近的纵剖面显微组织如图 3 所示。试样在外力作用下发生变形, 原始晶粒沿着试样被拉伸的方向伸长, T1 制度试样原始组织的等轴  $\alpha$  相变形为条状  $\alpha$  相(图 3a ~ 3c),

T2 制度试样原始组织的等轴  $\alpha$  相 + 少量片状  $\alpha$  相变形为条状  $\alpha$  相 + 片状  $\alpha$  相(图 3d ~ 3f), 其中片状  $\alpha$  相保持原有取向, 片层间距增大, 取向不受拉伸变形方向的影响; 从组织变形程度分析, 随着测试温度的降低, 试样变形程度加剧, 且 T1 制度试样断口处的晶粒变形程度均高于 T2 制度试样。

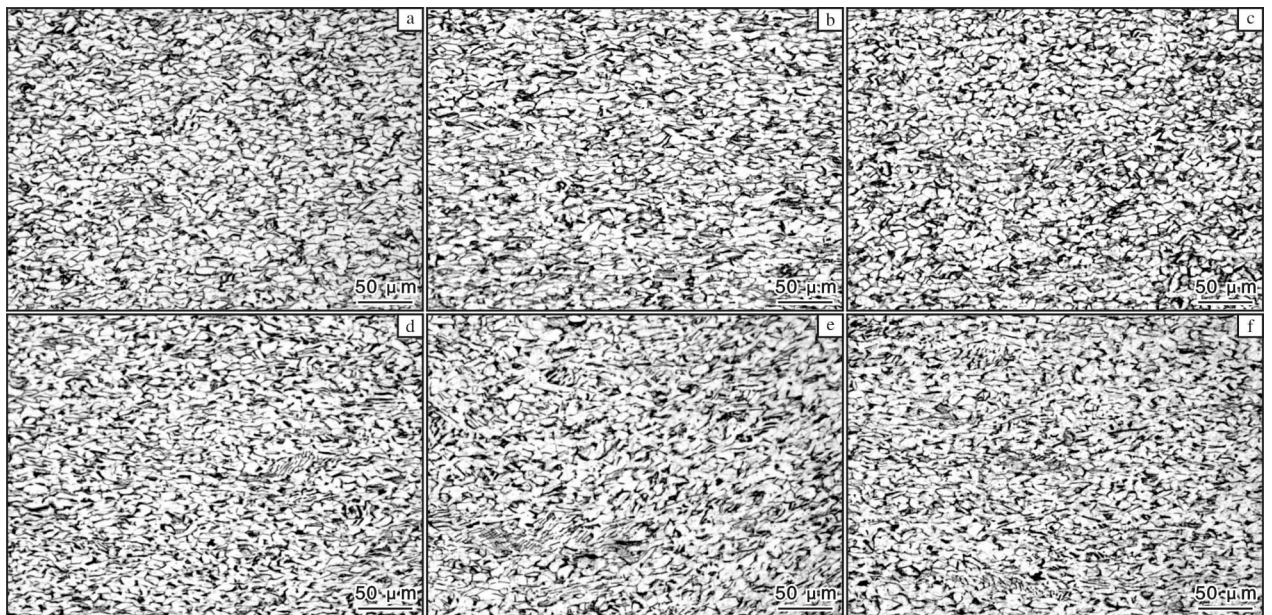


图3 不同制度热处理后 TA34 钛合金管材在不同温度下拉伸后的显微组织

Fig. 3 Microstructures of TA34 titanium alloy tubes heat treated by different treatments after tensile at different temperatures :

(a) 293 K, T1; (b) 77 K, T1; (c) 20 K, T1; (d) 293 K, T2; (e) 77 K, T2; (f) 20 K, T2

在拉伸作用下, 晶粒内部沿着最有利的滑移方向发生变形, 产生大量位错, 位错在晶界处塞积, 导致晶粒变形; 随着温度的降低, 位错滑移启动的临界分切应力增大, 滑移开动需要更大的分切应力,

致使晶粒剧烈畸变<sup>[7-8]</sup>; T1 制度试样为均匀细小的等轴  $\alpha$  组织, 在同等作用下, 变形均匀分散在较多的晶粒内进行, 每个晶粒中产生塞积的位错数量减少, 因应力集中引起的开裂机会较少, 使 T1 制度

试样在拉伸断裂前能够承受较大的变形量，因而 T1 制度试样的晶粒畸变程度高于 T2 制度试样。

### 2.2 力学性能

图 4 为不同制度 TA34 钛合金管材分别在 293、77、20 K 下的拉伸性能曲线。由图 4 显示，经 2 种不同制度热处理的管材力学性能均满足 GJB 9583—2018 要求。T1、T2 制度管材的抗拉强度和屈服强度均随着测试温度的降低而上升，从 293 K 至 77 K 强度上升较快，增长幅度分别为 73.6%、66.9%，77 K 至 20 K 强度上升比较平缓，增长幅度分别为 16.21%、12.7%；T1、T2 制度管材在 3 种测试温度下的抗拉强度、屈服强度相当；T1 制度管材的塑性高于 T2 制度管材；随着测试温度的不断下降，T1 制度管材的塑性下降不明显，T2 制度管材从 293 K 至 77 K 塑性基本不变，从 77 K 至 20 K 塑性急剧下降，下降幅度为 32%。

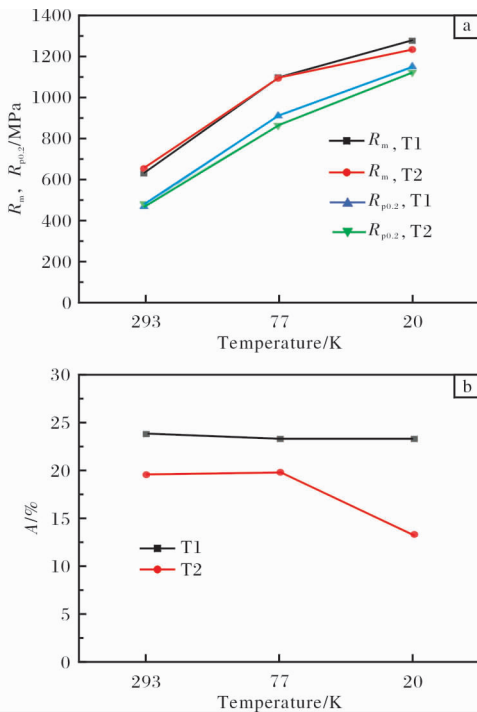


图 4 TA34 钛合金管材拉伸性能随测试温度的变化

Fig. 4 Various of tensile properties vs. test temperatures of TA34 titanium alloy tubes: (a) strength; (b) elongation

图 5 为 TA34 钛合金管材拉伸试样在 77、20 K 下的低温应力-位移曲线。从图 5 可以看出，77 K 低温拉伸应力-位移曲线呈现连续变形，20 K 低温拉伸应力-位移曲线呈现锯齿波现象，波幅由小逐渐增大直至断裂。T1 制度试样的锯齿波数量多于 T2 制度试样，这与 2 种制度试样在低温拉伸测试过程

中晶粒的畸变程度相对应。

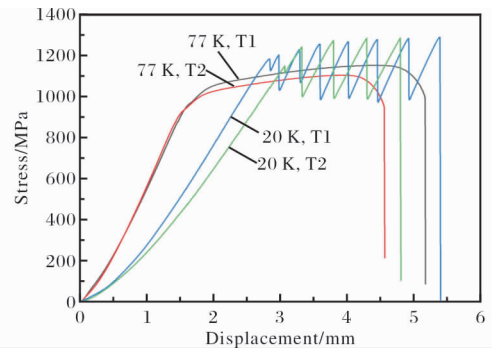


图 5 TA34 钛合金管材拉伸试样的低温应力-位移曲线  
Fig. 5 Curves of low temperature stress vs. displacement of TA34 titanium alloy tubes tensile specimens

随着测试温度的降低，位错滑移启动的临界分切应力增大，位错运动愈发困难，从而在晶界处产生位错塞积，导致合金需要更高的应力才能使位错重新开动，宏观表现为低温强度上升；在密排六方结构中，孪生切应力随着温度的降低变化不大，20 K 低温更有利于孪生变形的发生，孪生变形可以调节周围晶粒取向，使滑移系转动到有利的位置重新开动，滑移与孪生交互作用<sup>[9]</sup>，使得 TA34 钛合金试样变形连续，能够保持较好的塑性，同时也说明了 77 K 和 20 K 下强度上升速率不同的内在本质。齿状波动是绝热变形引起的<sup>[10]</sup>。在 TA34 钛合金拉伸变形过程中，加工硬化引起应力集中，应力上升，随着变形热的产生使集中应力得到释放，应力下降，这种局部绝热变形导致齿状波动的出现，并且随着变形加剧，开动变形的临界切应力增大，齿状波变化幅度加剧。

### 2.3 成材率统计

通过将成品管材轧制前的普通退火制度替换为等温分级退火制度，在管材轧制过程中可以有效对变形端进行矫正，最后对成品管材进行普通退火处理，将退火温度降低、退火时间缩短来减少吊装端的变形区域，从而提高管材的成材率。从轧制管材的宏观形貌来看，T2 制度管材的变形端长度明显缩短，优于 T1 制度管材。对两种制度处理的 TA34 钛合金管材最终尺寸进行测量统计，T2 制度管材的成材率为 44.9%，相比 T1 制度管材（成材率为 39.5%）提高 5.4%。考虑到 TA34 钛合金管材的实际使用情况，T1 制度管材的强塑性匹配更好，T2 制度可有效提高管材的成材率，降低生产成本，二者各有优势。

### 3 结 论

(1) 经道次间普通退火 + 成品等温分级退火(T1 制度)处理的 TA34 钛合金管材, 组织形貌为等轴  $\alpha$  相, 晶粒平均尺寸约为 12  $\mu\text{m}$ ; 经道次间普通退火 + 最后一道次轧制前等温分级退火 + 成品普通退火(T2 制度)处理的管材组织形貌为等轴  $\alpha$  相伴随少量变形的片状  $\alpha$  相, 晶粒尺寸为 12 ~ 18  $\mu\text{m}$ 。

(2) T1、T2 2 种制度处理的 TA34 钛合金管材经 293、77、20 K 拉伸变形, 原始晶粒沿着试样被拉伸的方向伸长, 变形程度随着温度的降低逐渐加剧, 且 T1 制度试样断口处晶粒变形程度高于 T2 制度试样。

(3) TA34 钛合金管材 77 K 低温拉伸应力-位移曲线呈现连续变形, 20 K 低温拉伸应力-位移曲线呈现锯齿波现象, 波幅由小逐渐增大直至断裂。T1 制度试样的锯齿波数量多于 T2 制度试样。

(4) 2 种热处理制度获得的 TA34 钛合金管材在测试温度 293、77、20 K 下的强度相当, 且随着测试温度的降低而上升; T1 制度管材的塑性随着测试温度的降低下降不明显, 优于 T2 制度管材。

(5) 通过对 TA34 钛合金管材热处理制度进行调整, 可提高成品管材的成材率, 调整后管材的成材率为 44.9%, 高于未调整前的 39.5%。

### 参考文献 References

- [1] 黄朝文, 葛鹏, 赵永庆, 等. 低温钛合金的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(1): 254 - 260.
- [2] Kotobu Nagat. Titanium and its alloys for cryogenic structural materials[J]. Journal of the Cryogenic Society of Japan, 1987, 22(6): 347 - 357.
- [3] 江志强, 杨合, 詹梅, 等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 44 - 50.
- [4] 洪权, 戚运莲, 赵彬, 等. 不同 Q 值冷轧对 TA18 钛合金管材结构及力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2016, 33(2): 16 - 19.
- [5] 孙花梅, 刘伟, 戚运莲, 等. Ti-B25 钛合金管材挤压成形数值模拟及实验研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 25 - 29.
- [6] 杜宇, 刘伟, 郭荻子, 等. CT20 钛合金挤压管坯冷轧过程中的组织演化[J]. 钛工业进展, 2015, 32(2): 28 - 31.
- [7] 杜宇, 蔡学章, 杨冠军. CT20 钛合金 20K 下的应变行为与组织关系分析[J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 14 - 17.
- [8] 刘伟, 卢天健, 杨冠军, 等. CT20 钛合金管材的冷轧工艺及组织性能的研究[J]. 钛工业进展, 2009, 26(6): 15 - 18.
- [9] 范承亮, 杨冠军, 于振涛, 等. CT20 合金的不同显微组织与拉伸性能研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(2): 330 - 333.
- [10] 杨冠军, 蔡学章, 杜宇, 等. 试验温度对 Ti-3Al-2.5Zr 合金拉伸应变行为的影响[J]. 金属学报(S1): 1999, 35(1): 475 - 478.

## 2021 年 7—9 月日本海绵钛产销数据统计

时 间	海绵钛产量/t	国内出货量/t	国外出货量/t	出货量合计/t
2021 年 7 月	3044	961	2205	3166
2021 年 8 月	3190	926	2912	3838
2021 年 9 月	3216	1096	3386	4482
合 计	9450	2983	8503	11 486

## 2021 年 10—12 月日本钛产品产销数据统计

时 间	钛锭产量 /t	钛材出货量/t			钛产品出口量/t			钛产品进口量/t		
		国内	国外	合计	未锻 轧钛	粉末及 废料	其他钛 制品	未锻轧钛 及粉末	废料	其他钛 制品
2021 年 10 月	937	323	593	916	3246	581	806	49	63	80
2021 年 11 月	1179	346	740	1086	3359	305	596	41	63	87
2021 年 12 月	1159	365	673	1038	3167	279	792	42	22	79
合 计	3275	1034	2006	3040	9772	1165	2194	132	148	246