

# 固溶时效处理对 TC30 钛合金轧制棒材组织与性能的影响

陶海林<sup>1</sup>, 孙虎代<sup>2</sup>, 冯秋元<sup>1,2</sup>, 蒋纪新<sup>2</sup>, 张伟<sup>2</sup>

(1. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

(2. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

**摘要:** 研究了固溶时效处理对 TC30 钛合金轧制棒材显微组织与力学性能的影响。结果表明: 随着固溶温度的升高, 等轴  $\alpha$  相含量降低, 合金强度先升高后降低; 随着固溶后冷却速度的加快, 组织中等轴  $\alpha$  相含量减少, 细片层状  $\beta$  转变组织含量增加, 合金强度明显提升。经不同温度时效处理后, 合金组织均由等轴  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织组成, 且随着时效温度的升高, 次生  $\alpha$  相粗化, 合金强度明显下降, 塑性略有增大。综合考虑, TC30 钛合金轧制棒材经 900 °C/1 h/WC+550 °C/8 h/AC 热处理后可获得强度与塑性的较佳匹配。

**关键词:** TC30 钛合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)01-023-05

## Effect of Solution and Aging Treatment on Microstructure and Properties of TC30 Titanium Alloy Rolled Bar

Tao Hailin<sup>1</sup>, Sun Hudai<sup>2</sup>, Feng Qiuyuan<sup>1,2</sup>, Jiang Jixin<sup>2</sup>, Zhang Wei<sup>2</sup>

(1. Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

(2. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China)

**Abstract:** The effects of solution and aging treatments on the microstructure and mechanical properties of TC30 titanium alloy rolled bars were studied. The results show that with the increase of solution temperature, the content of equiaxed  $\alpha$  phase decreases, and the strength of the alloy first increases and then decreases. With the acceleration of cooling rate after solution treatment, the content of equiaxed  $\alpha$  phase in the microstructure decreases, while the content of fine layered  $\beta$ -transformed microstructure increases, and the strength of the alloy is significantly improved. After aging treatment at different temperatures, the microstructure consists of equiaxed  $\alpha$  phase and  $\beta$ -transformed microstructure, and with increasing aging temperature, the secondary  $\alpha$  phase coarsens, and the strength of the alloy significantly decreases while the plasticity slightly increases. Considering all factors, TC30 titanium alloy bars can achieve a better match between strength and plasticity through heat treatment of 900 °C/1 h/WC+550 °C/8 h/AC.

**Keywords:** TC30 titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical properties

BT14(Ti-4.5Al-3Mo-1V)钛合金是由苏联航空材料研究院开发研制的一种马氏体型  $\alpha+\beta$  两相钛合金, 其综合力学性能优异, 焊接性和热稳定性好, 可用来制作高压容器、压气机盘、紧固件等关键部件, 被广泛应用于航空、航天、舰船等领域<sup>[1]</sup>。该合金含有适量的  $\alpha$  稳定性元素 Al, 同时具有强  $\beta$  稳定性元素 Mo 和 V, 通过固溶处理可使更多的  $\beta$  相稳定至室温, 并通过随后时效处理析出细小、弥散的次生  $\alpha$  相, 从而

实现材料的强化。我国对 BT14 钛合金成分进行了优化, 系统开展了不同规格棒材、饼材、板材等研制, 技术日渐成熟<sup>[2-3]</sup>。在 GB/T 3620.1—2016《钛及钛合金牌号和化学成分》中, 该合金被命名为 TC30。

目前, 国内学者对 TC30 钛合金的研究主要集中在板材轧制工艺和退火处理制度<sup>[4]</sup>。通常, 对于直径 26 mm 以上的钛合金棒材以及大规格锻件、板材, 采用自由锻造方式进行生产, 而对于直径 26 mm 以下的小规格棒材, 则采用轧制方式。与大规格锻件、板材相比, 小规格钛合金棒材的加工路径存在显著差异,

收稿日期: 2025-11-21

通信作者: 陶海林(1975—), 男, 高级工程师。

其原始组织特征及后续热处理响应机制迥异。虽然已有文献报道了热处理温度对 TC30 钛合金板材组织与性能影响的相关研究<sup>[1]</sup>, 但该合金轧制棒材在固溶时效处理过程中的组织演变及固溶冷却方式和时效温度对棒材组织与性能的影响规律仍不明确。

为此, 系统研究了固溶温度、固溶冷却方式、时效温度等热处理工艺参数对 TC30 钛合金轧制棒材显微组织与力学性能的影响, 以期为该合金轧制棒材的工业化生产提供数据支撑。

## 1 实验

实验材料为宝鸡钛业股份有限公司生产的 TC30 钛合金铸锭, 金相法测得其相变点  $T_{\beta}$  为 955 °C。铸锭经开坯及多火次锻造为轧制用  $\phi 150$  mm 坯料。将坯料加热至  $\alpha+\beta$  两相区, 经两火次轧制成  $\phi 20$  mm 棒材。轧制态棒材原始组织为  $\alpha+\beta$  两相区加工组织, 所有原始  $\beta$  晶界均完全破碎,  $\beta$  转变组织上均匀分布着初生  $\alpha$  相。表 1 为 TC30 钛合金棒材的化学成分。

表 1 TC30 钛合金棒材的化学成分(wt%)

Table 1 Chemical composition of TC30 titanium alloy bar

	Ti	Al	Mo	V	Fe	Si	C	N	H	O
TC30	Bal.	4.6	2.7	1.3	0.11	0.02	0.01	0.01	0.001	0.10
GB/T 3620.1—2016	Bal.	3.5–6.3	2.5–3.8	0.9–1.9	≤0.3	≤0.15	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.15

在 TC30 钛合金轧制棒材上切取长度为 150 mm 的拉伸试样, 采用 RX-160KW 高精度箱式电阻炉(控温精度为  $\pm 3$  °C)进行热处理, 具体热处理制度见表 2。依据 GB/T 5168—2020《钛及钛合金高低倍组织检验方法》, 采用 JSM-6480 型扫描电镜(SEM)进行显微组织观察。拉伸试样加工成 R7 标准试样, 依据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》, 采用 CMT5105 电子万能试验机进行室温拉伸性能测试。

表 2 TC30 钛合金试样热处理制度

Table 2 Heat treatment processes of TC30 titanium alloy samples

No.	Solution treatment	Aging treatment
A1	860 °C/1 h/WC	
A2	900 °C/1 h/WC	550 °C/8 h/AC
A3	940 °C/1 h/WC	
A4	980 °C/1 h/WC	
B1	900 °C/1 h/AC	550 °C/8 h/AC
B2	900 °C/1 h/FC	
C1		500 °C/8 h/AC
C2	900 °C/1 h/WC	600 °C/8 h/AC
C3		650 °C/8 h/AC

## 2 结果与分析

### 2.1 固溶温度对组织与性能的影响

图 1 为 TC30 钛合金棒材分别在 860、900、940、980 °C 保温 1 h 后水冷, 再经 550 °C/8 h/AC 时效处理后的显微组织。由图 1 可以看出, 随着固溶温度的升

高, 合金中  $\alpha$  相含量不断降低。固溶温度为 860 °C 时, 合金组织以等轴  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织为主, 初生  $\alpha$  相含量约为 30%, 见图 1a; 随着固溶温度的升高, 促进了  $\alpha$  相向  $\beta$  相的转变, 900 °C 固溶后细片层组织含量明显增加, 初生  $\alpha$  相含量降低为 15%, 见图 1b; 固溶温度为 940 °C 时, 由于固溶温度接近  $\beta$  相变温度, 合金中出现大量细片层组织, 且片层集束宽度增加、长度变长, 初生  $\alpha$  相含量不足 5%, 见图 1c; 进一步提高固溶温度至 980 °C 时, 合金在单相区固溶, 初生  $\alpha$  相消失,  $\beta$  相中析出  $\alpha$  片层或集束, 见图 1d。这是由于固溶温度已超过相变点, 在水冷过程中,  $\beta$  相发生无扩散相变, 析出  $\alpha$  片层或集束。 $\alpha$  片层或集束尺寸粗化与  $\beta$  晶粒快速长大直接相关。

图 2 为不同固溶温度下, TC30 钛合金棒材的室温拉伸性能。由图 2 可以看出, 固溶温度为 860 °C 时, 合金的抗拉强度和屈服强度均较低, 塑性相对较好。这主要是因为组织中的初生  $\alpha$  相含量(约 30%)较高, 等轴初生  $\alpha$  相能够有效协调合金的塑性变形。当固溶温度升高至 900 °C 时, 抗拉强度和屈服强度明显升高, 塑性略有下降。这是因为合金中的初生  $\alpha$  相随着固溶温度的升高而减少, 细片层组织增加。细片层组织具有较高的界面密度, 能够有效阻碍位错运动, 从而提高合金强度。固溶温度为 940 °C 时, 由于片层集束显著粗化, 片层间距增大, 降低了  $\alpha/\beta$  相界面密度, 削弱了界面强化效果, 导致合金强度降低。在 980 °C 单相区固溶后,  $\beta$  相中析出  $\alpha$  片层或集束, 由于固溶温度高,  $\alpha$  片层或集束明显粗化, 片层增厚、集束间距变小, 使得合金在经受长时间加载时, 裂纹萌生和扩展的路径缩短, 导致塑性明显下降, 但强度变化不大。

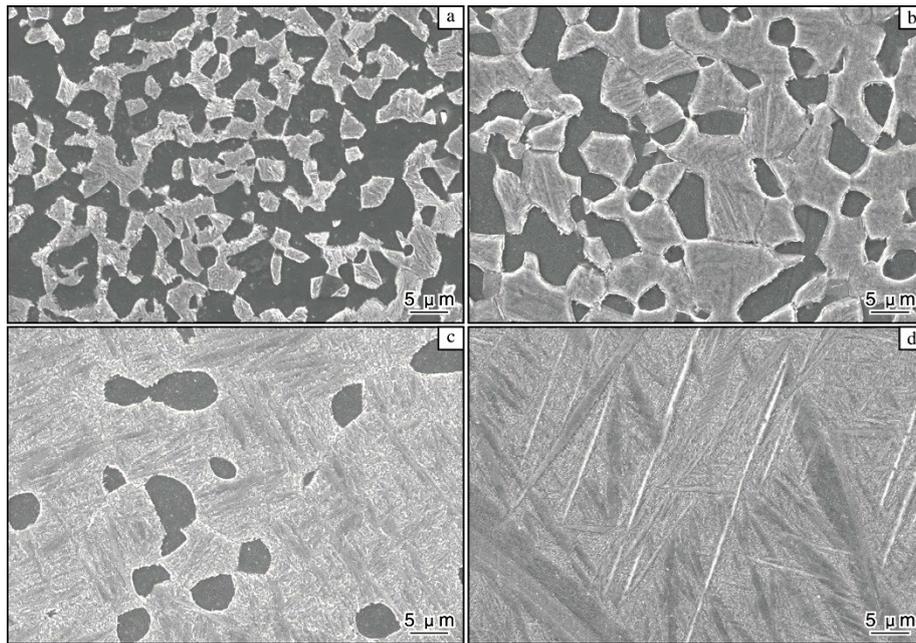


图 1 不同固溶温度下 TC30 钛合金棒材的显微组织

Fig.1 Microstructures of TC30 titanium alloy bars at different solution temperatures: (a) 860 °C; (b) 900 °C; (c) 940 °C; (d) 980 °C

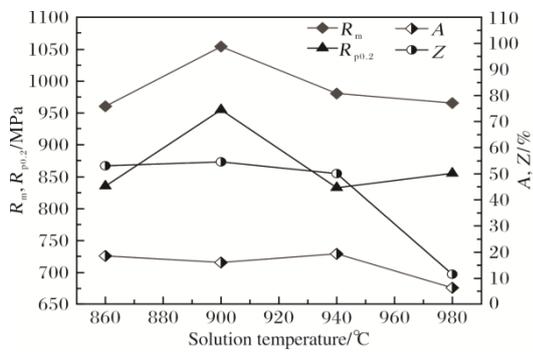


图 2 不同固溶温度下 TC30 钛合金棒材的室温拉伸性能  
Fig.2 Room temperature tensile properties of TC30 titanium alloy bars at different solution temperatures

### 2.2 固溶冷却方式对组织与性能的影响

TC30 钛合金棒材在 900 °C 保温 1 h, 分别以水冷、空冷和炉冷方式冷却, 再经 550 °C/8 h/AC 时效处理后的显微组织见图 3。由图 3 可以看出, 固溶后采用水冷或空冷, 合金组织由等轴  $\alpha$  相和细片层状  $\beta$  转变组织组成, 并且随着冷却速度的加快, 等轴  $\alpha$  相含量减少,  $\beta$  转变组织含量增加。在水冷和空冷方式下, 冷却速度较快, 合金中易形成马氏体、亚稳  $\beta$  相等不稳定相, 时效过程中会发生  $\beta$ 、 $\alpha'$  相向  $\alpha+\beta$  相转变。当平衡  $\beta$  相含量较多时,  $\beta$  相在  $\alpha'$  相界面上形成连续的片层<sup>[5]</sup>。固溶后采用炉冷方式冷却, 冷却速度大幅下降,  $\beta$  相转变充分, 获得接近平衡态的等轴  $\alpha$  相+ $\beta$  转变组

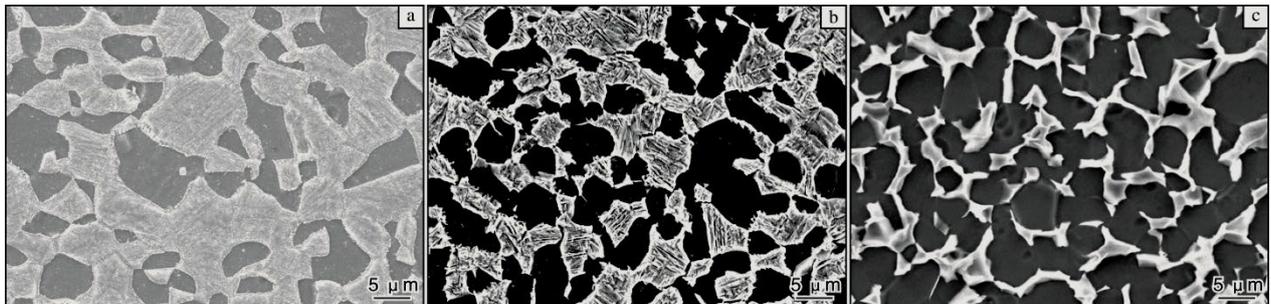


图 3 不同固溶冷却方式下 TC30 钛合金棒材的显微组织

Fig.3 Microstructures of TC30 titanium alloy bars under different solution cooling methods: (a) water cooling; (b) air cooling; (c) furnace cooling

织,且等轴 $\alpha$ 相含量明显高于水冷和空冷方式,如图3c所示。

图4为不同固溶冷却方式下TC30钛合金棒材的室温拉伸性能。由图4可以看出,随着固溶冷却速度的降低,TC30钛合金棒材的抗拉强度和屈服强度明显降低,断后伸长率和断面收缩率略有增加。其中,水冷方式下的抗拉强度最高,约为1050 MPa。这归因于水冷后合金基体中弥散分布的细小 $\alpha$ 相产生了强烈的沉淀强化作用。炉冷后获得等轴组织,但在时效过程中无强化相析出,因此合金强度较低。冷却方式为空冷时,虽然合金中有一定量的细片层 $\alpha$ 相,但与水冷方式相比,片层集束的宽度增大,因而合金强度下降,但高于炉冷试样。固溶后采用不同的冷却方式,合金

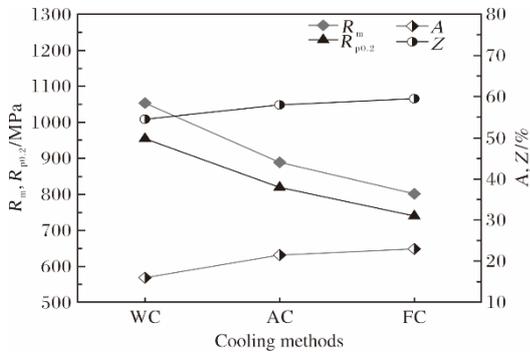


图4 不同固溶冷却方式下TC30钛合金棒材的室温拉伸性能

Fig.4 Room temperature tensile properties of TC30 titanium alloy bars under different solution cooling methods

均具有良好的塑性。这主要是因为是在 $T_\beta$ 以下固溶时,合金中均存在一定含量的初生 $\alpha$ 相,限制了 $\beta$ 晶粒长大,且时效处理后保留的部分初生 $\alpha$ 相有利于塑性变形,因而合金表现出良好的塑性<sup>[6-8]</sup>。

### 2.3 时效温度对组织与性能的影响

TC30钛合金棒材经900 °C/1 h/WC固溶处理后,分别在500、550、600、650 °C加热保温8 h时效处理后的显微组织如图5所示。由图5可以看出,不同温度时效处理后的显微组织均由等轴初生 $\alpha$ 相和 $\beta$ 转变组织组成,且初生 $\alpha$ 相的含量基本不变,均为15%左右。随着时效温度的升高,次生 $\alpha$ 相的片层厚度明显增加,因而其间距也增大。时效温度为500 °C时,由于合金中原子扩散能力相对有限,导致次生 $\alpha$ 相以细小的片状或针状形式在 $\beta$ 基体中弥散析出,数量多且密度大,见图5a;当时效温度升高至550 °C时,合金中原子扩散能力增强,次生 $\alpha$ 相发生轻微粗化,但其分布依然均匀、致密,这是产生显著沉淀强化效应的理想组织形态,见图5b;随着时效温度进一步升高,次生 $\alpha$ 相的粗化加剧,600 °C时效后可以观察到次生 $\alpha$ 相片层厚度明显增加,间距增大,见图5c;当时效温度达到650 °C时,次生 $\alpha$ 相发生显著粗化,片层结构变得更为粗大,间距显著增加,见图5d。经600、650 °C时效处理后,合金组织整体更接近于平衡状态,见图5c、5d。TC30钛合金在不同温度下时效的组织演变过程遵循Ostwald熟化机制,即小尺寸的析出

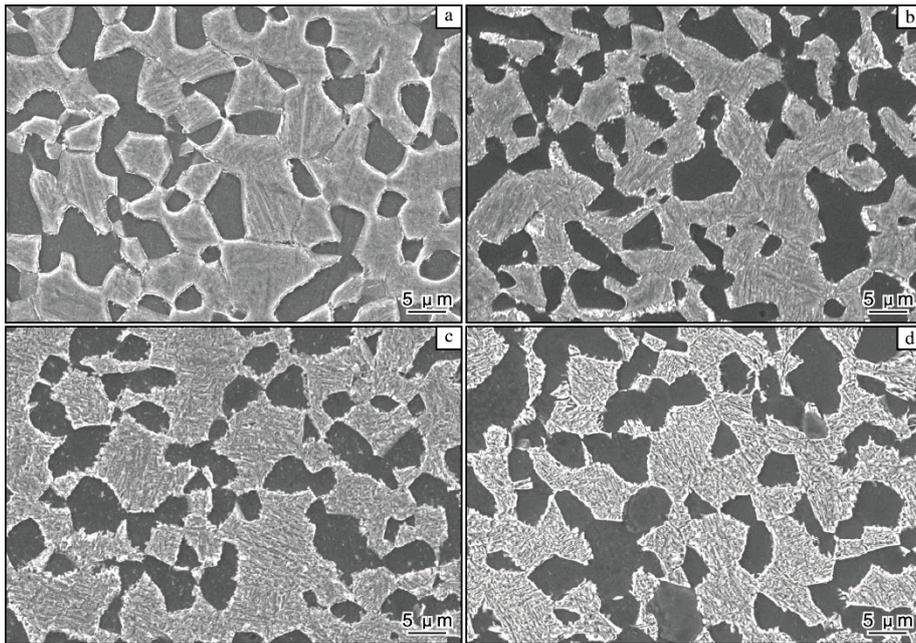


图5 不同时效温度下TC30钛合金棒材的显微组织

Fig.5 Microstructures of TC30 titanium alloy bars at different aging temperatures: (a) 500 °C; (b) 550 °C; (c) 600 °C; (d) 650 °C

相溶解, 大尺寸的析出相继续长大, 以降低系统总界面能。

图 6 为不同时效温度下, TC30 钛合金棒材的室温拉伸性能。由图 6 可以看出, 随着时效温度的升高, TC30 钛合金棒材抗拉强度和屈服强度呈下降趋势。时效温度为 500 °C 时, 合金强度最高, 这归因于细小、弥散的次生  $\alpha$  相对位错运动产生了明显的阻碍作用, 因而强化效果最为显著。当时效温度超过 550 °C 时, 由于次生  $\alpha$  相粗化, 片层间距增大, 对位错的钉扎作用减弱, 导致强化效果衰减, 强度随之明显下降。与强度变化趋势相反, 合金塑性随时效温度的升高而略有增大。在 500 °C 时效时, 虽然合金强度最高, 但细小、弥散的析出相形成更多的应力集中点, 不利于位错的协调运动, 因而塑性较低。综合考虑, TC30 钛合金棒材经 900 °C/1 h/WC+550 °C/8 h/AC 热处理后, 可获得强度与塑性的较佳匹配。

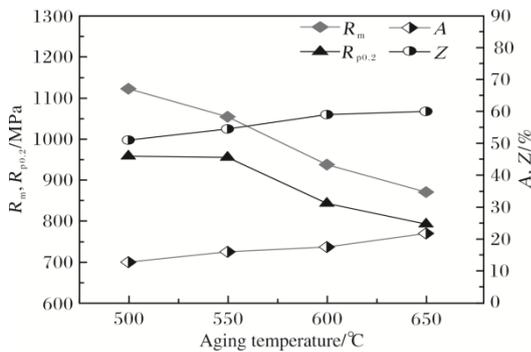


图 6 不同时效温度下 TC30 钛合金棒材的室温拉伸性能  
Fig.6 Room temperature tensile properties of TC30 titanium alloy bars at different aging temperatures

### 3 结 论

(1) TC30 钛合金轧制棒材在相变点以下固溶处理, 时效后形成等轴初生  $\alpha$  相+ $\beta$  转变组织, 且随着固

溶温度的升高, 等轴初生  $\alpha$  相含量减少, 合金强度先增大后降低; 在相变点以上固溶处理,  $\alpha$  片层或集束明显粗化, 合金强度变化不大, 塑性明显下降。

(2) 随着固溶后冷却速度的加快, TC30 钛合金组织中等轴  $\alpha$  相含量减少, 细片层状  $\beta$  转变组织含量增加, 合金强度明显提升。

(3) 随着时效温度的升高, 次生  $\alpha$  相片层厚度明显增加, 合金强度下降, 塑性增大。

(4) TC30 钛合金轧制棒材经 900 °C/1 h/WC+550 °C/8 h/AC 热处理可获得强度与塑性的较佳匹配。

### 参考文献 References

[1] 张海龙. BT14 钛合金板材研制[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013: 7-9.

[2] 宗影影, 单德彬, 吕炎. 热压缩 Ti-4.5Al-3Mo-1V 合金的流变应力行为[J]. 锻压技术, 2005(3): 50-52.

[3] 宗影影, 薛克敏, 单德彬, 等. 热处理对 BT14 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(5): 546-548.

[4] 郭伟, 王启, 宋德军, 等. 冷却速率对 BT14 钛合金组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(10): 23-28.

[5] 陈浩, 候岳红, 张曦, 等. 固溶时效处理对 Ti-5.43Al-3.11Mo-1.41V 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(7): 156-159.

[6] 杨海瑛, 刘全明. 高强 Ti-26 合金室温压缩性能和显微组织演变研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(4): 1232-1237.

[7] Chong Y, Bhattacharjee T, Park M-H, et al. Factors determining room temperature mechanical properties of bimodal microstructures in Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 730: 217-222.

[8] 纪晓宇, 徐建伟, 张宇, 等. 固溶冷速对超高强钛合金 TB17 组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(3): 665-670.

### 行业动态

### 2025 年 1—3 月日本钛材产销数据统计

时间	国内钛材出货量/t	国外钛材出货量/t	钛材出货量合计/t
2025 年 1 月	288	642	930
2025 年 2 月	344	448	792
2025 年 3 月	379	441	820
合计	1011	1531	2542

王运锋摘自《チタン》