

# 热处理工艺对大规格 TC17 钛合金棒材组织与力学性能的影响

郭萍, 强菲, 王欢, 张磊

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 研究了固溶温度、冷却方式、保温时间及取样方向对两相区锻造的大规格 TC17 钛合金棒材显微组织和力学性能的影响, 并根据实验结果选择最佳热处理制度。结果表明: TC17 钛合金棒材的最佳热处理工艺为 800 °C/2 h/WQ+630 °C/8 h/AC; 固溶温度在两相区时, 随着固溶温度的升高, 合金强度升高, 塑性降低; 固溶空冷+时效的合金较相同温度固溶水冷+时效的合金强度高、塑性低; 在相同温度固溶水冷条件下, 缩短固溶保温时间, 可改善合金的塑性; 锻造后的 TC17 钛合金大规格棒材存在各向异性。

**关键词:** TC17 钛合金; 大规格棒材; 热处理工艺; 微观组织; 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(2024)03-019-05

## Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Mechanical Properties of Large Size TC17 Titanium Alloy Bar

Guo Ping, Qiang Fei, Wang Huan, Zhang Lei

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

**Abstract:** Effects of solution temperature, cooling method, holding time and sampling direction on the microstructure and mechanical properties of large size TC17 titanium alloy bar were studied, and the best heat treatment was selected according to the experimental results. The results show that the optimum heat treatment process of TC17 titanium alloy is 800 °C/2 h/WQ+630 °C/8 h/AC. Heat treatment in  $\alpha+\beta$  phase zone and the same cooling conditions, the strength of the alloy increases and the plasticity decreases with the increasing of solution temperature within the two phase region. The strength of the alloy is higher and the plasticity is lower after solid solution treatment followed by air cooling and aging than that after solid solution treatment followed by water cooling and aging at the same temperature. The ductility of the alloy can be improved by shortening solution holding time under the same temperature and water cooling. The large size TC17 titanium alloy bar after being forged exists anisotropism.

**Keywords:** TC17 titanium alloy; large size bar; heat treatment process; microstructure; mechanical properties

近年来,随着航空工业的不断发展,航空发动机对材料规格及性能提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。TC17 钛合金作为一种富  $\beta$  型两相钛合金,具有高强、高韧和高淬透性,是航空发动机压气机的重要候选材料之一<sup>[2-3]</sup>。在中温下,TC17 钛合金的强度超过 Ti-6Al-4V 和 Ti-6242 合金,并具有较高的蠕变抗力,主要用作气轮发动机零件,如风扇盘和压气机盘件<sup>[4-8]</sup>。随着锻件整体化设计的发展,对 TC17 钛合金棒材规格的要求不断增大,这就对材料的

组织均匀性和性能一致性提出了更高的要求。

钛合金加工工艺与其组织、性能关系错综复杂,并且大规格棒材由于加工过程中的尺寸效应,对其性能指标要求更加苛刻,因此深入研究不同热处理工艺对大规格棒材性能的影响极其重要。为此,开展了大规格 TC17 钛合金棒材热处理工艺研究,分析材料不同方向的组织均匀性及性能一致性情况,以期为该材料的工程应用提供工艺指导。

## 1 实验

实验材料为两相区热轧加工的  $\phi 350$  mm 大规格 TC17 钛合金棒材,名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo,

收稿日期: 2024-03-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3705601); 西安市科技计划项目(22GXFW0142); 基础加强计划技术领域基金项目(2021-JCJQ-JJ-0197)

通信作者: 郭萍(1978—),女,正高级工程师。

合金  $T_{\beta}$  相变点为  $(890 \pm 10) ^\circ\text{C}$ 。TC17 钛合金棒材的原始组织为典型的等轴组织, 主要由初生  $\alpha$  相和转变  $\beta$  相组成, 等轴  $\alpha$  相均匀分布在基体中, 并且基体中有少量的短棒状  $\alpha$  相, 如图 1 所示。

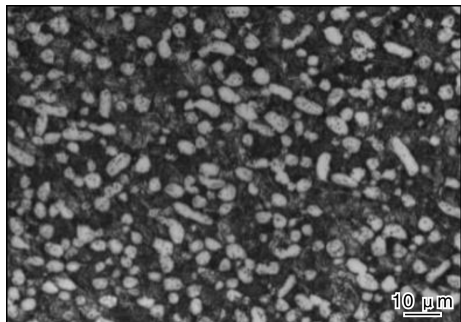


图1 TC17 钛合金棒材原始组织

Fig.1 Original microstructure of TC17 titanium alloy bar

沿 TC17 钛合金棒材径向 (R) 和轴向 (L) 切取  $\phi 5 \text{ mm} \times \text{M}10 \text{ mm}$  的拉伸试样。采用箱式电阻炉, 按照表 1 所示热处理工艺对试样进行热处理。其中, 固溶处

表 1 TC17 钛合金棒材热处理工艺

Table 1 Heat treatment processes of TC17 titanium alloy bar

| No.             | Heat treatment process                                    | Sample direction |
|-----------------|-----------------------------------------------------------|------------------|
| 1 <sup>#</sup>  | 800 $^\circ\text{C}$ /4 h/AC+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 2 <sup>#</sup>  | 820 $^\circ\text{C}$ /4 h/AC+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 3 <sup>#</sup>  | 840 $^\circ\text{C}$ /4 h/AC+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 4 <sup>#</sup>  | 860 $^\circ\text{C}$ /4 h/AC+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 5 <sup>#</sup>  | 800 $^\circ\text{C}$ /4 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 6 <sup>#</sup>  | 800 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 7 <sup>#</sup>  | 840 $^\circ\text{C}$ /4 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 8 <sup>#</sup>  | 860 $^\circ\text{C}$ /4 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 9 <sup>#</sup>  | 910 $^\circ\text{C}$ /2 h/AC                              | R                |
| 10 <sup>#</sup> | 910 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ                              | R                |
| 11 <sup>#</sup> | 910 $^\circ\text{C}$ /2 h/AC+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 12 <sup>#</sup> | 930 $^\circ\text{C}$ /2 h/AC+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 13 <sup>#</sup> | 950 $^\circ\text{C}$ /2 h/AC+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 14 <sup>#</sup> | 910 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 15 <sup>#</sup> | 930 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 16 <sup>#</sup> | 950 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | R                |
| 17 <sup>#</sup> | 800 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | L                |
| 18 <sup>#</sup> | 820 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | L                |
| 19 <sup>#</sup> | 840 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | L                |
| 20 <sup>#</sup> | 860 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | L                |
| 21 <sup>#</sup> | 910 $^\circ\text{C}$ /2 h/WQ+630 $^\circ\text{C}$ /8 h/AC | L                |

理温度分别选用相变点以下 800、820、840、860  $^\circ\text{C}$  和相变点以上 910、930、950  $^\circ\text{C}$ , 冷却方式选用空冷和水冷, 保温时间选取 2 h 和 4 h; 时效制度均为 630  $^\circ\text{C}$ /8 h/AC。采用 Instron1195 电子万能试验机进行拉伸性能测试。采用 Olympus MG3 光学显微镜和 JSM6460 扫描电子显微镜进行显微组织观察与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织分析

#### 2.1.1 固溶温度的影响

图 2 为 TC17 钛合金棒材经两相区固溶空冷+时效处理后的显微组织。从图 2 可以看出, 两相区固溶+时效处理后显微组织表现为典型的双态组织, 在转变  $\beta$  基体上分布着一定数量的  $\alpha$  相, 这些  $\alpha$  相大小形状各异。此外, 转变  $\beta$  基体中分布有次生  $\alpha$  相。随着固溶温度的升高, TC17 钛合金棒材组织中初生  $\alpha$  相尺寸减小, 含量降低, 并且固溶温度越高, 这种特征越明显, 固溶温度为 860  $^\circ\text{C}$  时, 组织中的初生  $\alpha$  相含量明显减少 (图 2d)。

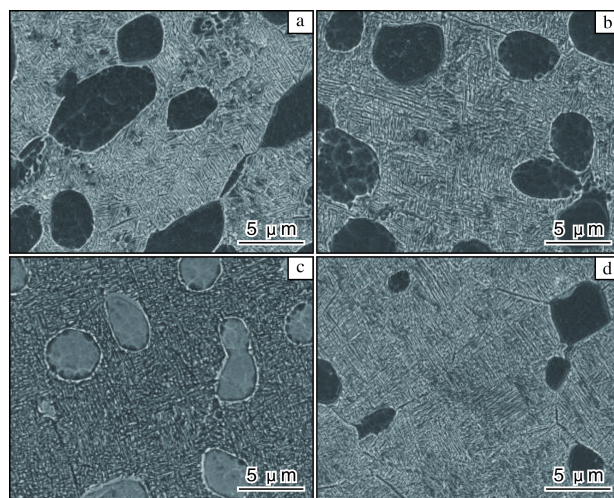
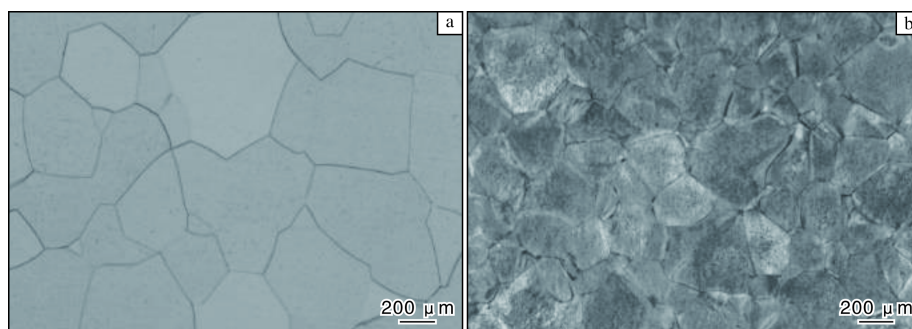


图 2 TC17 钛合金棒材经两相区固溶空冷+时效处理后的显微组织

Fig.2 Microstructures of TC17 titanium alloy bar heat treated in two phase zone by air cooling and aging treatment: (a) 1<sup>#</sup>; (b) 2<sup>#</sup>; (c) 3<sup>#</sup>; (d) 4<sup>#</sup>

图 3 为 TC17 钛合金棒材经  $\beta$  相区 910  $^\circ\text{C}$  固溶水冷及 910  $^\circ\text{C}$  固溶水冷+时效处理后的显微组织。从图 3 可以看出, 经  $\beta$  相区固溶处理后, TC17 钛合金棒材均为典型的魏氏组织, 且时效前后组织均呈现为粗大的  $\beta$  晶粒, 不同的是时效处理后, 固溶过程析出的马氏体相和亚稳  $\beta$  相 (图 3a) 发生分解, 生成细小弥散的颗粒分布于基体内部 (图 3b)。

图3 TC17 钛合金棒材经 $\beta$ 相区热处理后的显微组织Fig.3 Microstructures of TC17 titanium alloy bar heat treated in beta phase zone: (a) 10<sup>#</sup>; (b) 14<sup>#</sup>

### 2.1.2 冷却方式的影响

在相变点以下热处理, 冷却方式对 $\alpha$ 相的形态会产生重要影响。图4为TC17钛合金棒材经不同温度固溶水冷+时效处理后的显微组织。从图4可以看出, 固溶水冷后的组织形貌与固溶空冷后相差不大, 由初生 $\alpha$ 相、

次生 $\alpha$ 相以及转变 $\beta$ 相组成, 均为典型的双态组织, 并且随着固溶温度升高, 初生 $\alpha$ 相含量减少, 次生 $\alpha$ 相含量增多。与空冷组织(图2)相比, 水冷后的次生 $\alpha$ 相细而短, 晶间 $\beta$ 相明显, 主要是由于快速水冷抑制了次生 $\alpha$ 相的析出长大及粗化。

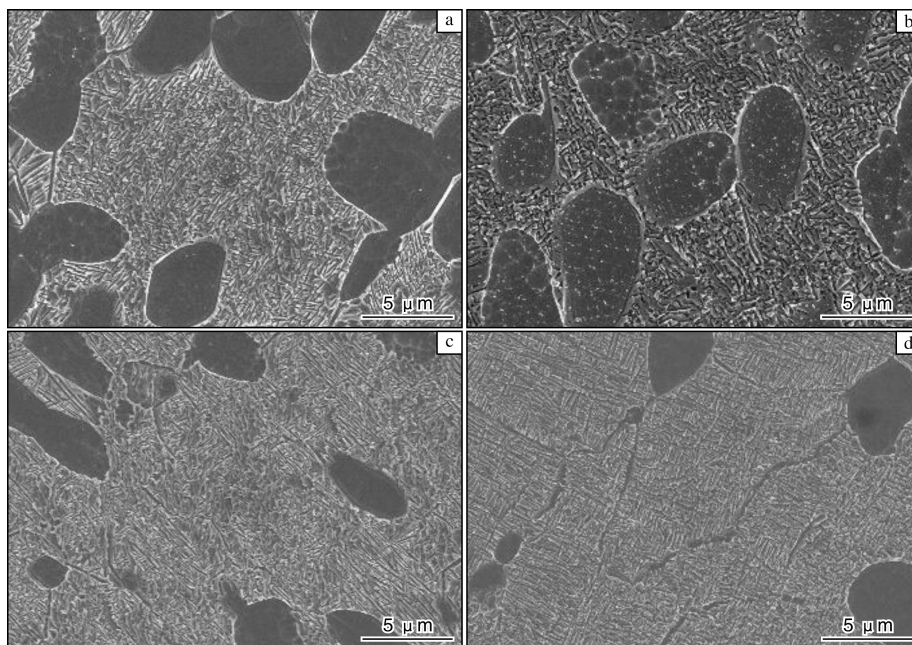


图4 TC17 钛合金棒材经两相区固溶水冷+时效处理后的显微组织

Fig.4 Microstructures of TC17 titanium alloy bar heat treated in two phase zone by water quenching and aging treatment: (a) 5<sup>#</sup>; (b) 6<sup>#</sup>; (c) 7<sup>#</sup>; (d) 8<sup>#</sup>

## 2.2 力学性能分析

### 2.2.1 两相区热处理

表2为TC17钛合金棒材径向拉伸试样经两相区(800、820、840、860℃)固溶+时效处理后的力学性能。从表2可以看出, 在固溶空冷和水冷条件下, 随着固溶温度升高, TC17钛合金棒材强度升高, 塑性降低。结合显微组织分析发现, 固溶温度为800℃时, TC17

钛合金棒材显微组织中的初生 $\alpha$ 相约占60%, 固溶温度升高到860℃时, 初生 $\alpha$ 相含量不超过20%, 次生 $\alpha$ 相明显增多。初生 $\alpha$ 相的减少和次生 $\alpha$ 相的增多, 导致材料在变形过程中晶界难以滑移, 次生 $\alpha$ 相难以协调变形, 因而材料强度增高及塑性降低。通过对比还发现, 水冷条件下TC17钛合金棒材的塑性较高, 具有较好的强塑性匹配, 并且800℃/2h/WC+时效处理后, 棒材显示



出最佳的强塑性匹配。TC17 钛合金属于一种富  $\beta$  的两相钛合金，固溶过程可保留亚稳  $\beta$  相，固溶保温时间过长会导致  $\beta$  晶粒尺寸长大而影响强度和塑性，保温时间太短会导致  $\alpha$  相向  $\beta$  相转变不充分，组织球化和均匀化不好，影响塑性。结合图 2 和图 4 发现，TC17 钛合金棒材经固溶空冷+时效处理和固溶水冷+时效处理后均显示双态组织，但相同条件下水冷状态的初生  $\alpha$  相较空冷状态的初生  $\alpha$  相晶粒尺寸稍大，并且空冷状态下次生  $\alpha$  相的长度和宽度均比水冷条件下的大，故在力学性能上显示出很大的差异。主要原因是固溶水冷后发生了马氏体相变，快速冷却过程中生成的亚稳相在时效过程中会向平衡组织转变，较大的内应力促使转变更加充分，水冷后时效析出的次生  $\alpha$  相更加短小，晶界由转变  $\beta$  相组成，短小的次生  $\alpha$  相比空冷状态较长的次生  $\alpha$  相更易于协调变形，从而导致合金塑性提高<sup>[9-10]</sup>。而固溶温度升高，合金的初生  $\alpha$  相明显减少，变形过程中晶界滑移系较少，导致合金强度升高。因此，TC17 钛合金棒材经 800 °C/2 h/WQ+630 °C/8 h/AC 热处理后显示出较好的强塑性匹配。

表 2 TC17 钛合金棒材经两相区热处理后的力学性能（径向）

| No.            | $R_m$ /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | $A$ /% | $Z$ /% | $R_{p0.2}/R_m$ |
|----------------|------------|-----------------|--------|--------|----------------|
| 1 <sup>#</sup> | 1195       | 1138            | 7.5    | 21     | 0.95           |
| 2 <sup>#</sup> | 1252       | 1166            | 7      | 19     | 0.93           |
| 3 <sup>#</sup> | 1310       | 1242            | 6.5    | 16     | 0.95           |
| 4 <sup>#</sup> | 1377       | 1304            | 4      | 10     | 0.95           |
| 5 <sup>#</sup> | 1174       | 1132            | 10     | 24     | 0.96           |
| 6 <sup>#</sup> | 1154       | 1106            | 12     | 31     | 0.96           |
| 7 <sup>#</sup> | 1225       | 1177            | 6      | 14     | 0.96           |
| 8 <sup>#</sup> | 1268       | 1203            | 5      | 9      | 0.95           |

2.2.2  $\beta$  相区热处理

图 5 为 TC17 钛合金棒材经  $\beta$  相区 910、930、950 °C 热处理后的力学性能，对应试样编号为表 1 中的 9<sup>#</sup>~16<sup>#</sup>，固溶时间为 2 h，时效制度为 630 °C 保温 8 h 后空冷。从图 5 可以看出，仅固溶处理的 TC17 钛合金棒材强度较低，空冷条件下抗拉强度仅为 832 MPa，水冷条件下强度较空冷条件下略高。主要是由于在相变点以上固溶处理，显微组织为典型的魏氏组织，这种组织主要由粗大的  $\beta$  晶粒组成，变形过程由于晶界强度较弱，导致合金强度较低。

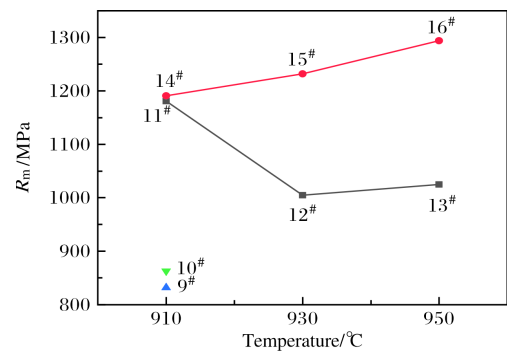


图 5  $\beta$  相区热处理对 TC17 钛合金棒材力学性能的影响  
Fig.5 Effect of heat treatments in  $\beta$  phase zone on mechanical properties of TC17 titanium alloy bar

TC17 钛合金棒材经时效处理后强度明显增加，但其拉伸试验均未测得延伸率，即相变点以上固溶处理后冷却方式不论空冷还是水冷，材料均表现为脆性断裂。从图 5 还可以看出，在相变点以上固溶+时效处理，空冷条件下当固溶温度由 910 °C 升高至 930、950 °C 时，TC17 钛合金棒材的抗拉强度明显降低，而在水冷条件下，强度随着固溶温度升高而增加，并且水冷后的抗拉强度高于空冷后，主要是由于水冷条件下析出的针状马氏体和亚稳  $\beta$  相在时效处理后较空冷析出相的强化作用明显。分析以上原因，时效处理后 TC17 钛合金棒材强度升高主要是由于固溶产生的马氏体及亚稳  $\beta$  相在时效处理后发生分解，引起时效强化。

2.3 取样方向对合金力学性能的影响

表 3 为 TC17 钛合金棒材轴向拉伸试样经不同温度固溶保温 2 h 水冷+630 °C 保温 8 h 空冷时效处理后的力学性能。从表 3 可以看出，随着固溶温度的升高，TC17 钛合金棒材轴向拉伸试样的强度升高，塑性降低，与径向拉伸试样表现出相同的变化趋势。此外，轴向拉伸试样的强度和塑性均大于径向拉伸试样，说明 TC17 钛合金棒材存在各向异性。800 °C 保温 2 h 固溶+时效处理

表 3 TC17 钛合金棒材经不同温度固溶+时效处理后的力学性能（轴向）

| No.             | $R_m$ /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | $A$ /% | $Z$ /% | $R_{p0.2}/R_m$ |
|-----------------|------------|-----------------|--------|--------|----------------|
| 17 <sup>#</sup> | 1153       | 1136            | 16     | 52     | 0.99           |
| 18 <sup>#</sup> | 1182       | 1145            | 15     | 45     | 0.97           |
| 19 <sup>#</sup> | 1258       | 1199            | 11     | 33     | 0.95           |
| 20 <sup>#</sup> | 1361       | 1295            | 7.5    | 23     | 0.95           |
| 21 <sup>#</sup> | 1376       | 1349            | —      | —      | 0.98           |



后,轴向屈服强度较径向增加了 30 MPa,增幅约为 2.7%,但延伸率增加了 33%。从数据对比中还可以发现,TC17 钛合金棒材固溶水冷后的屈强比较高,整体保持在 0.95 以上,说明将其用作结构件具有较高的可靠性。

### 3 结 论

(1) 随着固溶温度升高,TC17 钛合金中等轴  $\alpha$  相含量减少,次生  $\alpha$  相含量增多,较快的冷却速率可抑制晶粒的长大和粗化。

(2) TC17 钛合金大规格棒材固溶空冷后的强度高于水冷后,但合金塑性较低。 $800\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}/\text{WQ}+630\text{ }^{\circ}\text{C}/8\text{ h}/\text{AC}$  处理可获得最佳的强塑性的匹配。

(3) TC17 钛合金棒材具有较高的屈强比,将其作为结构件具有较高的可靠性。

#### 参考文献 References

- [1] 周昊,王耀奇,李红,等. 置氢 TC17 钛合金组织演变规律及高温变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(3): 947-952.
- [2] 朱培亮,辛社伟,毛小南,等. 高温钛合金的热稳定性研究进展[J]. 钛工业进展, 2023, 40(1): 42-48.
- [3] 蔡建明,弭光宝,高帆,等. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与发展[J]. 材料工程, 2016, 44(8): 1-10.
- [4] 郭峰,刘德林,梁伟,等. TC17 钛合金叶盘破裂分析效分析与预防[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(1): 62-66.
- [5] 李久楷,刘永杰,王清远,等. TC17 钛合金高温超高周疲劳实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1567-1573.
- [6] 岳旭,冯浩,马恩惠,等. Ti-17 钛合金  $\phi 350\text{ mm}$  规格棒材锻造工艺研究[J]. 中国钛业, 2012, 4(4): 16-19.
- [7] 赵坤,王敏,蔺成效,等. TC17 钛合金自表面纳米化机制及组织演化[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2048-2052.
- [8] 刘继雄,岳旭,杨军,等. TC17 钛合金两相区变形时的失稳行为及组织特征[J]. 机械工程材料, 2015, 39(12): 71-74+79.
- [9] 徐斌,王晓英,周建华,等. TC17 钛合金子啊热变形过程中的组织演变规律[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(专辑 1): 168-172.
- [10] 孙晓敏,刘栋,汤海波,等. TC17 钛合金构件激光直接成形固态相变行为及显微组织[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(4): 724-729.

#### 行业动态

### “稀有金属材料加工国家工程研究中心第一届技术交流研讨会” 在西北有色金属研究院成功召开

5月28-29日,在陕西省发展和改革委员会指导下,由西北有色金属研究院主办的“稀有金属材料加工国家工程研究中心第一届技术交流研讨会”在其院本部学术报告厅成功举办。中国科学院院士张荻,陕西省发改委创新和高新技术发展处处长安军,西北有色金属研究院党委书记、稀有金属材料加工国家工程研究中心主任李建峰,副院长张于胜,院长助理、科技处处长、稀有金属材料加工国家工程研究中心副主任徐海龙出席本次交流研讨会。250余名来自国内知名高校、研究院所及企业的专家、学者与会交流。

本次交流研讨会开幕式由张于胜主持,李建峰、安军分别致辞,徐海龙作会议总结。

会议期间,张荻院士作了题为“金属材料的构型化复合”的报告,分享了金属基复合材料系列研究成果。大会报告广泛涉及稀有金属材料加工新工艺新技术、装备及产线革新、航空航天舰船领域应用新趋势等多个方面,内容丰富且颇具深度。

本次会议增进了国内稀有金属材料加工相关技术的共享、合作和交流,更好地发挥了稀有金属材料加工国家工程研究中心的引领作用,将在促进成果转化、推动稀有金属材料加工技术创新和产业升级方面产生积极影响。

稀有金属材料加工国家工程研究中心(以下简称中心)依托西北有色金属研究院组建而成,成立于1995年,是我国首批且唯一的稀有金属材料加工工程化研究开发机构。2014年,该中心顺利完成国家创新能力建设任务;2021年,被纳入全国首批次新序列管理的稀有金属材料领域国家工程研究中心。作为稀有金属领域的国家队成员,中心始终聚焦于稀有金属材料加工领域的工程化研究和技术开发,秉持解决行业共性关键技术问题的定位和使命,积极开展从稀有金属材料加工的基础理论到产品开发和产业化的全链条研究工作。在出色完成国家任务的同时,以市场需求为导向,紧密联系科研源头和产业群体,开创性地建立了国家工程中心机制创新运营模式,并取得了显著成就。展望未来,中心将进一步深度融入国家和行业的发展大局,紧紧围绕国家战略需求和产业发展瓶颈,坚定不移地实施创新驱动高质量发展战略,不断拓展新材料研究领域,高度重视人才培养,进一步加强外部合作交流,健全并完善运行管理制度,持续推进技术创新和管理改革,强化关键共性技术和工程化产业化技术研究,充分发挥国家级科技创新平台的重要作用。

(向程晨 吴欢供稿)