

# TB6 钛合金等温锻后热处理工艺研究

李雪飞, 黄利军, 黄旭, 张明杰

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 采用等温锻压机对 TB6 钛合金方棒进行等温锻造, 锻造完成后对锻件进行水淬和空冷 2 种不同方式的冷却, 再对水淬的锻件进行时效处理, 空冷的锻件进行固溶 + 时效处理。研究了等温锻后热处理工艺对 TB6 钛合金组织和力学性能的影响。结果表明, 等温锻后水淬,  $\alpha$  相尺寸较小, 等温锻后空冷,  $\alpha$  相尺寸较大; 水淬后  $\beta$  基体上无感生  $\alpha$  相, 空冷后  $\beta$  基体上有感生  $\alpha$  相形成; 水淬 + 时效后析出的次生  $\alpha$  相比空冷再经固溶 + 时效后析出的次生  $\alpha$  相更加混乱。TB6 钛合金经等温锻后水淬 + 时效处理, 其强度和塑性与等温锻后空冷至室温再进行固溶 + 时效的水平相当, 且平面应变断裂韧度更高。

**关键词:** TB6 钛合金; 等温锻造; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG337.6; TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9964(2020)02-031-04

## Research on Heat Treatment Process of TB6 Titanium Alloy after Isothermal Forging

Li Xuefei, Huang Lijun, Huang Xu, Zhang Mingjie

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** TB6 titanium alloy square bar was isothermal forged by isothermal forging press in this research, the forged billets were cooled by different ways that water quenching and air cooling. The forged billets by water-quenched were aged and the forged billets by air-cooled were solid solution and aged after cooled. The effects of different heat treatments on the microstructure and mechanical properties of TB6 titanium alloy after isothermal forged were studied. The results show that alpha phase size of TB6 titanium alloy by water-quenched after isothermal forged is smaller than that by air-cooled after isothermal forged, there is no induced alpha phase in beta base of titanium alloy by water-quenched and there is induced alpha phase in beta base of titanium alloy by air-cooled. The precipitated secondary alpha phase of titanium alloy by water-quenched after aged is more chaotic than that by air-cooled after solid solution and aged. After isothermal forged, the strength and plasticity of TB6 titanium alloy by water-quenched after aged are similar to that by air cooled after solid solution and aged, but the fracture toughness of the former is higher than that of the latter.

**Key words:** TB6 titanium alloy; isothermal forging; microstructure; mechanical properties

随着现代飞机和武器装备对材料性能要求的不断提升, 传统钢材已经无法满足其使用要求。钛合金具有高的比强度、优良的耐蚀性、良好的高温性能等一系列优点, 已被越来越多的应用于航空航天、武器装备等领域<sup>[1-3]</sup>。

TB6 钛合金 (Ti-10V-2Fe-3Al) 是一种典型的近  $\beta$  型钛合金<sup>[4,5]</sup>, 具有高强度、高断裂韧性、深淬透性

和强抗应力腐蚀能力等特点, 在航空工业中得到广泛应用。此外, 该合金还具有相变点低、锻造温度低和流动应力低等优点, 相比其他牌号的高强钛合金更容易锻造成形<sup>[6-9]</sup>, 更适宜采用等温锻造。经锻造后的 TB6 钛合金在制成零件前, 需要根据零件性能要求进行固溶和时效处理。实际生产中, 钛合金锻件锻造完成后需要空冷至室温再进行固溶和时效, 而固溶温度和等温锻造的锻造温度相近, 因此, 本研究将等温锻造完成后的 TB6 钛合金直接进行水淬 + 时效处理, 并与锻造完成后空冷至室温再进行

固溶+时效处理的锻件性能进行对比,研究等温锻造后热处理工艺对TB6钛合金组织与性能的影响,以期为后续热处理工艺改进提供参考。

## 1 实验

实验材料取自北京航空材料研究院钛合金研究所熔炼的 $\phi 330$  mm TB6钛合金铸锭。该铸锭以海绵钛和中间合金为原料,经过3次真空自耗熔炼而成,其 $\beta$ 相变点为 $790\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,化学成分见表1。

表1 TB6钛合金铸锭化学成分(w%)

Table 1 Chemical composition of TB6 titanium alloy ingot

| Al   | V     | Fe   | O     | N     | H       | Ti   |
|------|-------|------|-------|-------|---------|------|
| 3.16 | 10.32 | 1.80 | 0.080 | 0.008 | 0.001 6 | Bal. |

采用2000T快锻机对铸锭进行开坯、改锻,最后锻造成 $\phi 320$  mm的棒材。在同一根棒材上截取2件尺寸为 $75\text{ mm}\times 160\text{ mm}\times 180\text{ mm}$ 的方形棒材(轴向为锻压方向)。图1为TB6钛合金方形棒材的原始组织。可以看出,该棒材组织的 $\beta$ 基体上均匀分布着等轴初生 $\alpha$ 相,为等轴组织。

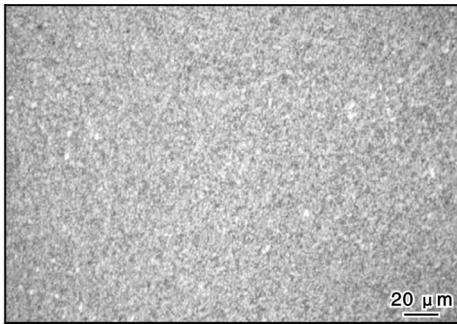


图1 TB6钛合金棒材的原始组织

Fig. 1 Original microstructure of TB6 titanium alloy bar

将TB6钛合金方形棒材和模具加热至 $T_{\beta}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在YH-1000等温锻压机上以一定速度进行等温模锻,2支棒材的锻压变形量均为50%。第1支棒材锻造完成后直接水淬,在水中静置30 min,然后进行时效处理,时效温度在 $510\sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温8 h后空冷,该锻件标记为1<sup>#</sup>;第2支棒材锻造完成后空冷,然后进行固溶和时效处理,固溶温度为 $T_{\beta}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温2 h后水淬,时效制度与1<sup>#</sup>锻件相同,该锻件标记为2<sup>#</sup>。分别从水淬后的1<sup>#</sup>锻件和空冷后的2<sup>#</sup>锻件上截取金相试样,采用Camscan-3100扫描电镜对显微组织进行观察对比;2支锻件时效后也分别截取金相试样,分析热处理工艺对组织的影响。采用英

斯特朗电子万能试验机分别对热处理后的1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>锻件横、纵向拉伸性能及平面应变断裂韧度进行测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织分析

方形棒材的等温锻造变形过程等同于棒材的单向压缩过程,棒材变形过程中主要有3个变形区<sup>[10]</sup>,分别为变形死区、大变形区和自由变形区,如图2所示。与上模、下模接触的部分为I区,该区域金属变形时与模具产生横向摩擦,摩擦力阻碍金属的横向流动,该区变形量小,属于变形死区,其组织与原始组织差别不大;棒材的心部为II区,金属受压过程,心部的金属流动受上模、下模约束,所以金属横向向外扩展,横截面面积增大,材料变形量大,有利于组织的演变,该区属于大变形区;棒材的外缘部分为III区,外缘金属受到心部金属的向外挤压力,横向向外扩展变形产生鼓肚,变形量介于变形死区和大变形区之间,该区属于自由变形区。为便于组织观察,所有金相试样均取自自由变形区。

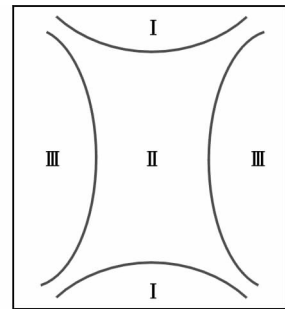


图2 方形棒材等温锻造变形示意图

Fig. 2 The deformation diagram of square bar during isothermal forging

图3为TB6钛合金方棒锻后水淬及锻后空冷态的显微组织。从图3可知,1<sup>#</sup>锻件锻后直接水淬,其组织中晶粒存在明显的边界, $\beta$ 基体上没有形成感生 $\alpha$ 相。这主要是因为1<sup>#</sup>锻件在等温锻造过程产生大量的位错,生成高的畸变能,并且在变形过程中发生动态再结晶,使晶粒得到细化。虽然位错有利于合金元素扩散,但水淬快速冷却致使合金元素来不及进行重新分布,所以 $\beta$ 基体上没有感生 $\alpha$ 相析出。2<sup>#</sup>锻件锻后空冷, $\beta$ 基体上有感生 $\alpha$ 相形成,晶粒没有明显的边界。这主要是由于空冷冷却速度较慢,合金元素有足够的时间进行扩散,所以 $\beta$ 基体上析出了感生 $\alpha$ 相。

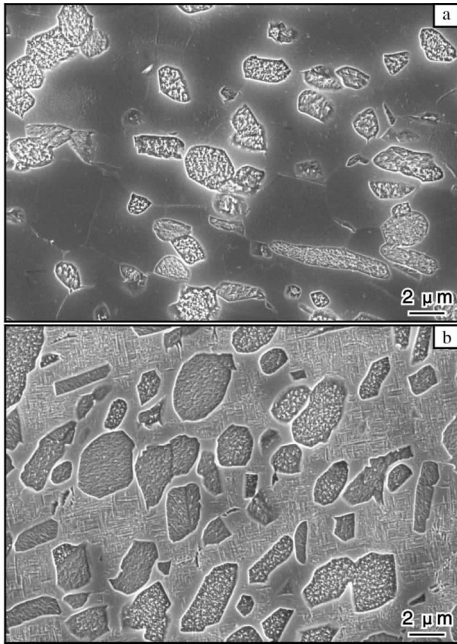


图3 TB6钛合金方棒锻后水淬及锻后空冷态的显微组织  
Fig.3 Microstructures of TB6 titanium alloy square bar in water quenching(a) and air cooling(b) after forging

图4为1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>锻件时效后的显微组织。从图4可知,1<sup>#</sup>锻件经时效后 $\beta$ 基体上析出混乱交织的次生 $\alpha$ 相,2<sup>#</sup>锻件经时效后析出的次生 $\alpha$ 相具有明显的方向性。

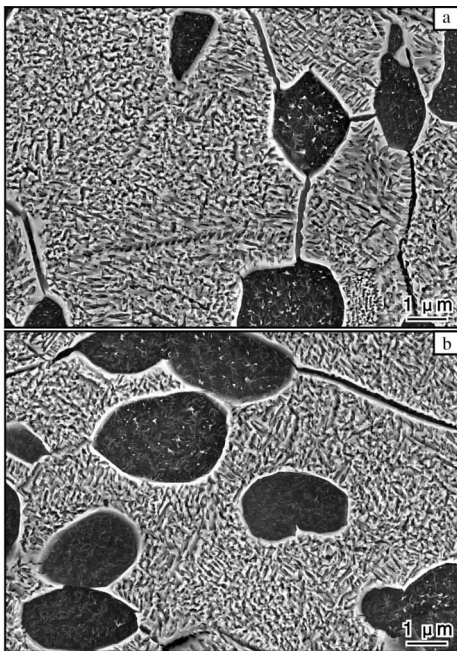


图4 1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>锻件时效后的显微组织  
Fig.4 Microstructures of 1<sup>#</sup> forging(a) and 2<sup>#</sup> forging(b) after aging

## 2.2 力学性能分析

表2为TB6钛合金方棒经热处理后的横、纵向拉伸性能。由表2数据可知,经不同工艺热处理后的1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>锻件的拉伸性能差异不大,都属于高强度级别,其中纵向抗拉强度都为1 200 MPa级别,横向抗拉强度都为1 150 MPa级别,塑性水平相当。材料的力学性能由显微组织决定。TB6钛合金方棒经不同工艺热处理后得到的拉伸力学性能相当,这主要是因为其组织中初生 $\alpha$ 相的含量和尺寸、次生 $\alpha$ 相的含量和尺寸基本相同。

表2 TB6钛合金方棒经热处理后的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of TB6 titanium alloy square bar after heat treatment

| Specimens              | Direction    | $R_m$ /MPa | $R_{\sigma.2}$ /MPa | $A$ /% | $Z$ /% |
|------------------------|--------------|------------|---------------------|--------|--------|
| 1 <sup>#</sup> forging | Longitudinal | 1 212      | 1 119               | 14.5   | 61.6   |
|                        |              | 1 211      | 1 127               | 11.5   | 59.6   |
|                        | Transverse   | 1 173      | 1 108               | 13.4   | 57.6   |
|                        |              | 1 154      | 1 102               | 12.5   | 60.0   |
| 2 <sup>#</sup> forging | Longitudinal | 1 207      | 1 158               | 13.1   | 59.8   |
|                        |              | 1 205      | 1 148               | 12.6   | 60.9   |
|                        | Transverse   | 1 152      | 1 115               | 10.6   | 59.0   |
|                        |              | 1 161      | 1 115               | 10.4   | 61.0   |

表3为1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>锻件时效后的平面应变断裂韧度。由表3可知,1<sup>#</sup>锻件的平面应变断裂韧度明显高于2<sup>#</sup>锻件,这主要是由于热处理工艺不同析出相的形态和分布不同所致。1<sup>#</sup>锻件锻后水淬过程有形变热处理的作用,形变热处理能够细化微观组织,且水淬时的快速冷却能够提高过冷度,增加形核的质点,同时快速冷却可抑制变形时产生的畸变能释放,为后续的时效相变提供驱动力,为马氏体向条状 $\alpha$ 相转变提供大量的结晶核心,改变 $\alpha$ 相的析出机制,从而得到混乱交织的次生 $\alpha$ 相<sup>[11]</sup>。2<sup>#</sup>锻件锻后空冷,冷却速度缓慢,材料有足够的时间对产生的畸变能进行释放,因此 $\beta$ 基体上析出短棒状的感生 $\alpha$ 相,并在后续的时效过程析出次生 $\alpha$ 相。析

表3 1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>锻件时效后的平面应变断裂韧度

Table 3 Plane-strain fracture toughness of 1<sup>#</sup> forging and 2<sup>#</sup> forging after aging

| Specimens              | Direction | $K_{1c}$ /MPa $\cdot$ m <sup>1/2</sup> |       |       |
|------------------------|-----------|--|-------|-------|
| 1 <sup>#</sup> forging | T-L       | 76.86                                  | 72.24 | 71.61 |
| 2 <sup>#</sup> forging | T-L       | 65.83                                  | 64.53 | 59.66 |

出的感生  $\alpha$  相和次生  $\alpha$  相生长时都具有择优取向, 排布具有一定的方向性。平面应变断裂韧度值与析出相的形貌和排布方式有密切的关系, 析出相混乱交织, 能够阻碍裂纹的扩展, 材料断裂需要消耗更多的能量, 所以 1# 锻件的平面应变断裂韧度高于 2# 锻件。

综上所述, TB6 钛合金等温锻造后, 采用直接水淬 + 时效的工艺制度替代空冷至室温再进行固溶 + 时效的工艺制度, 不仅能够缩短热处理周期, 而且能够提高合金的断裂韧性。

### 3 结 论

(1) TB6 钛合金等温锻后空冷,  $\beta$  基体上有感生  $\alpha$  相生成; 等温锻后水淬,  $\beta$  基体上无感生  $\alpha$  相生成。

(2) TB6 钛合金等温锻后直接水淬 + 时效析出的次生  $\alpha$  相比锻后空冷至室温再进行固溶 + 时效析出的次生  $\alpha$  相更加混乱, 具有更高的平面应变断裂韧度。

(3) TB6 钛合金等温锻后水淬 + 时效, 其强度和塑性与等温锻后空冷再经固溶 + 时效的水平相当。可用等温锻造后直接水淬 + 时效的工艺制度替代空冷至室温再进行固溶 + 时效的工艺制度。

#### 参考文献

[1] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry [J]. Materials science and Engineering A,

1996, 213(1-2): 103 - 114.

[2] 侯日立, 张元华, 卢志敏. 飞机钛合金烧伤及检测方法研究 [J]. 无损检测, 2003, 25(11): 575 - 578.

[3] 叶勇, 王金彦. 钛合金的应用现状及加工技术发展概况 [J]. 材料导报, 2012, 26(S1): 360 - 363.

[4] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册: 第 4 卷 钛合金、铜合金 [M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[5] 徐祖耀, 黄伯云. 中国材料工程大典 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[6] SAE International. Titanium Alloy, Forgings 10V-2Fe-3Al, Consumable Electrode Melted, Single-Step Solution Heat Treated and Overage 160 ksi (1103MPa) Tensile Strength: AMS4986E-2015 [S]. Warrendale: SAE International, 2015.

[7] 黄利军, 黄旭, 齐立春, 等. Ti-1023 钛合金淬透深度与拉伸断口分析 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S3): 382 - 385.

[8] 雷力明, 黄旭, 黄利军, 等. 铸态 TB6 钛合金热变形行为及本构关系 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 377 - 380.

[9] 邱伟, 鲁世强, 欧阳德来, 等. 锻态 TB6 钛合金热变形行为及组织演变 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17(3): 38 - 43.

[10] 叶文君, 脱祥明, 王世洪.  $\beta$ 21S 钛合金热压缩变形行为 [J]. 稀有金属, 2002, 26(1): 23 - 27.

[11] 王欢, 赵永庆, 辛社伟, 等. 高强韧钛合金热加工技术与显微组织 [J]. 航空材料学报, 2018, 38(4): 56 - 63.

#### 行业动态

## 宝钛股份成功签订宝鸡大剧院钛屋顶项目

近日, 宝鸡钛业股份有限公司成功签订了宝鸡大剧院造型屋面合同。这是继北京石林峡景区玻璃观光平台钛支撑架项目、普陀山寺庙屋顶钛瓦项目、海南钛避雷针项目后, 公司在国内建筑用钛领域取得的新成绩, 进一步奠定了宝钛在该领域的领先地位。

宝鸡大剧院造型屋面原设计为铝塑复合板。经公司多次与投资方会谈, 积极对造型屋面用钛材进行立项研究, 成功突破了造型屋面用钛的技术壁垒, 取得了投资方的认可。

此合同的成功签订, 标志着全国著名的“宝鸡·中国钛谷”拥有了自己的钛屋顶建筑, 改变了过去国家大剧院、杭州大剧院等大型建筑用钛板依赖进口的局面, 拓展了我国民用钛材应用领域, 对国产钛材在建筑行业上大规模应用具有里程碑式的意义。

来源: 宝鸡钛业股份有限公司官网