

# 轧制和热处理工艺对 TC4 钛合金棒材超声声速的影响

韩飞孝<sup>1</sup>, 孙小平<sup>1,2</sup>, 楼美琪<sup>1</sup>, 侯凡<sup>1</sup>, 李晓通<sup>1</sup>, 王凯旋<sup>1</sup>, 刘向宏<sup>1</sup>

(1. 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, 陕西 西安 710018)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 为实现对 TC4 钛合金棒材超声声速的控制, 对比研究了轧制和热处理(包括固溶处理、固溶时效处理和三重热处理)对 TC4 钛合金棒材超声声速的影响。结果表明: 轧制温度和变形量对 TC4 钛合金棒材超声声速影响较大, 随着轧制温度的降低和轧制变形量的增大, 超声声速逐渐降低; 热处理温度和冷却方式对棒材超声声速也有一定的影响, 随着固溶温度的升高和时效温度的降低, 超声声速逐渐升高; 与固溶时效处理相比, 经三重热处理后的棒材超声声速更高, 且第一重热处理采用水冷的棒材最终超声声速高于采用空冷的棒材。

**关键词:** TC4 钛合金; 轧制; 热处理; 超声声速

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)06-016-06

## Effect of Rolling and Heat Treatment Processes on Ultrasonic Velocity of TC4 Titanium Alloy Bar

Han Feixiao<sup>1</sup>, Sun Xiaoping<sup>1,2</sup>, Lou Meiqi<sup>1</sup>, Hou Fan<sup>1</sup>, Li Xiaotong<sup>1</sup>, Wang Kaixuan<sup>1</sup>, Liu Xianghong<sup>1</sup>

(1. National & Local Joint Engineering Laboratory for Special Titanium Alloy Processing Technologies,

Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To achieve ultrasonic velocity control of TC4 titanium alloy bars, the effects of rolling and heat treatment (including solution heat treatment, solution aging heat treatment and triple heat treatment) on the ultrasonic velocity of TC4 titanium alloy bars were studied. The results show that rolling temperature and deformation degree have a significant impact on the ultrasonic velocity of TC4 titanium alloy bars. With the decrease of rolling temperature and the increase of rolling degree, the ultrasonic velocity decreases gradually. The heat treatment temperature and cooling method also have a certain impact on the ultrasonic velocity of the bars. With the increase of solution temperature and the decrease of aging temperature, the ultrasonic velocity increases gradually. Compared with solution and aging heat treatment, the ultrasonic velocity after triple heat treatment is higher, and the final ultrasonic velocity of the bars cooled by water quenching after the first heat treatment is higher than that of the bars cooled by air.

**Keywords:** TC4 titanium alloy; rolling; heat treatment; ultrasonic velocity

TC4 钛合金是一种典型的两相钛合金, 具有高强度、高比强度和低弹性模量等优异特性, 除在航空航天工业中作为重要的结构材料外, 在生物医疗领域也得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>, 如用于制造医用超声刀<sup>[4]</sup>。超声刀因具有切割准确、止血快速等优点被广泛应用于外科手术中<sup>[5]</sup>。为保证超声刀使用的稳定性, 要求原材料 TC4 钛

合金棒材的超声声速控制在一定的范围, 且波动性越小越好。超声波在材料中的传播速度与材料的显微组织形态息息相关<sup>[6-7]</sup>, 而钛合金的显微组织形态除受到合金成分的影响外, 主要是由加工工艺决定的, 因此加工工艺对钛合金超声声速有显著的影响。郑念庆等<sup>[7]</sup>研究了相变点附近单重热处理对  $\phi 30$  mm TC4 钛合金精锻棒材超声声速的影响, 时靖等<sup>[8]</sup>研究了锻造温度和变形量对 TC4 钛合金锻件超声声速的影响, 李运等<sup>[9]</sup>研究了精锻温度、变形量及热处理制度对 Ti7Al4Mo 合金超声声速

收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-493)

通信作者: 刘向宏(1967—), 男, 教授级高工。

的影响。对于TC4钛合金棒材,除了需要进行常规的退火处理、固溶时效处理外,有时还需要进行三重热处理<sup>[10-12]</sup>,而关于轧制和多重热处理工艺对TC4钛合金棒材超声声速的影响尚未见报道。

以TC4钛合金轧制棒材为例,研究了轧制工艺、固溶时效热处理和三重热处理工艺对棒材超声声速的影响,以期为实现TC4钛合金轧制棒材超声声速的控制提供参考。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验所用材料为西部超导材料科技股份有限公司生产的 $\phi 45$  mm TC4钛合金棒坯,其化学成分见表1,相变点温度为995 °C。棒坯显微组织为典型的双态组织,如图1所示。

表1  $\phi 45$  mm TC4钛合金棒坯化学成分(wt%)

Table 1 Chemical composition of  $\phi 45$  mm TC4 titanium alloy billet

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
6.4	4.2	0.22	0.17	0.008	0.005	0.001	Bal.

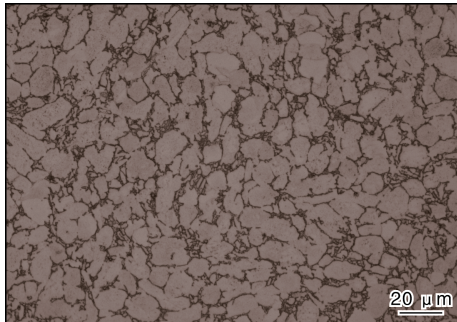


图1 TC4钛合金棒坯显微组织

Fig.1 Microstructure of TC4 titanium alloy billet

### 1.2 方法与设备

在 $\phi 45$  mm TC4钛合金棒坯上切取等长度的轧制坯料,按照表2所示方案进行棒材轧制,得到规格分别为 $\phi 12$ 、 $\phi 16$ 、 $\phi 25$  mm的TC4钛合金棒材。

表2 TC4钛合金棒材轧制方案

Table 2 Rolling schemes of TC4 titanium alloy bar

No.	Finished spec/mm	Rolling temperature/°C	Rolling degree/%
1	$\phi 12$	940	92.89
2	$\phi 16$	940	87.36
3	$\phi 25$	940	69.14
4	$\phi 25$	900	69.14
5	$\phi 25$	980	69.14

在940 °C轧制的 $\phi 25$  mm TC4钛合金棒材上切取热处理试样,按照表3所示方案进行固溶、固溶时效以及三重热处理试验。

表3 TC4钛合金棒材的热处理方案

Table 3 Heat treatment schemes of TC4 titanium alloy bar

No.	Heat treatment schemes
HT1	940 °C/1 h/AC
HT2	970 °C/1 h/AC
HT3	1000 °C/1 h/AC
HT4	970 °C/1 h/WQ
HT5	970 °C/1 h/AC+500 °C/3 h/AC
HT6	970 °C/1 h/AC+600 °C/3 h/AC
HT7	970 °C/1 h/AC+650 °C/3 h/AC
HT8	970 °C/1 h/WQ+500 °C/3 h/AC
HT9	970 °C/1 h/AC+930 °C/1 h/AC+500 °C/3 h/AC
HT10	970 °C/1 h/WQ+930 °C/1 h/AC+500 °C/3 h/AC

在轧制棒材和热处理后试样的心部切取金相试样,经研磨、抛光、腐蚀后,采用光学显微镜进行组织观察,并利用Image-Pro Plus 5.0图像分析软件统计 $\alpha$ 相含量。采用CL400型超声脉冲反射仪(探头频率10 MHz)测试试样心部的超声声速(测试误差 $\leq 3$  m/s),以3支平行试样的平均值作为实验结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 轧制对棒材超声声速的影响

#### 2.1.1 轧制变形量的影响

图2是940 °C轧制的 $\phi 12$ 、 $\phi 16$ 、 $\phi 25$  mm TC4钛合金棒材横向与纵向显微组织。从图2可以看出,轧制变形量不同时,棒材的显微组织形态有一定差异。随着变形量的增大,初生 $\alpha$ 相含量变化不明显,但纵向拉长程度显著增大且晶粒细化。这是由于轧制过程是多道次变形,每个道次都伴随着棒材温度的降低,变形量越大,轧制道次越多,温降越明显,故初生 $\alpha$ 相沿纵向拉长的程度就越明显,且在变形过程中由于发生动态再结晶导致晶粒细化。同时可以看出,随着变形量的增大,次生 $\alpha$ 相的形态也由平直的层片状转变为细碎的点状。这是由于成品规格越大,变形量越小,轧制道次越少,轧制结束后温度越高,次生 $\alpha$ 相主要在轧后冷却过程中从 $\alpha/\beta$ 相界、 $\beta$ 晶界或晶内高能缺陷处形核以层片形态析出并逐渐长大。但成品规格越小,轧制道次越多,轧制过程中伴随的温降也越明显,上道次轧制结束后析出的层片状次生 $\alpha$ 相会在下道次轧制过程中发生剧烈变形,经多个道次轧制变形后次生 $\alpha$ 相主要呈细碎的点状分布。

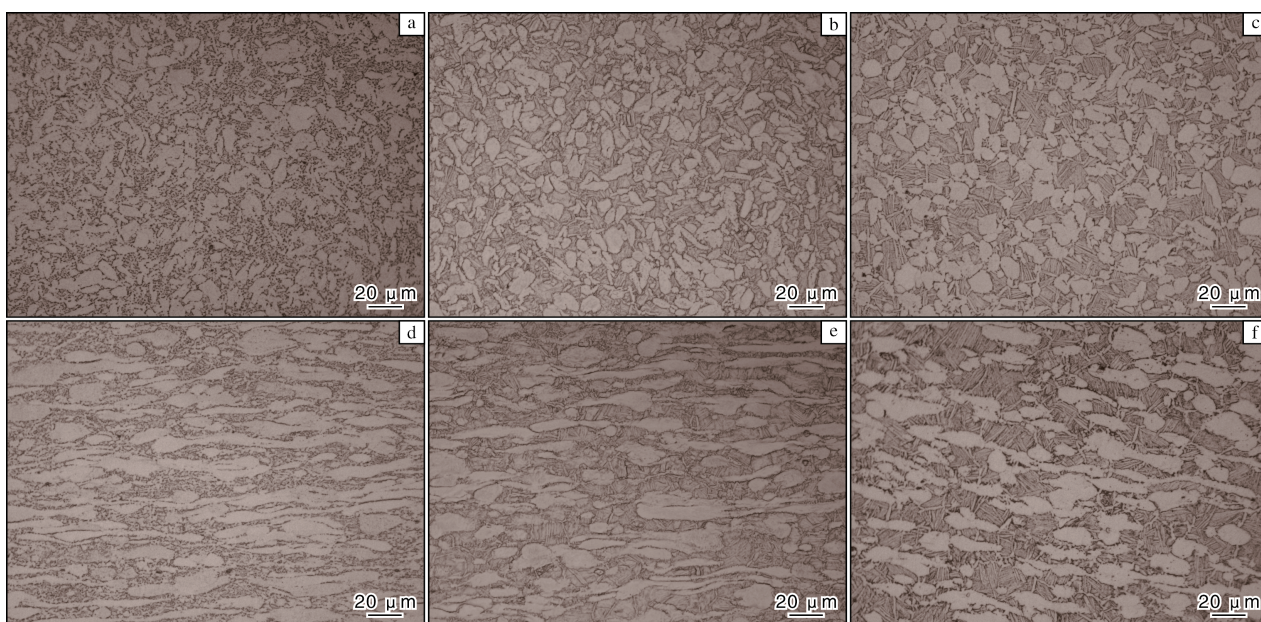


图2 940 °C下轧制的不同规格 TC4 钛合金棒材显微组织

Fig.2 Microstructures of different specification TC4 titanium alloy bars rolled at 940 °C: (a) φ12 mm, transverse; (b) φ16 mm, transverse; (c) φ25 mm, transverse; (d) φ12 mm, longitudinal; (e) φ16 mm, longitudinal; (f) φ25 mm, longitudinal

表4是在940 °C下经不同变形量轧制的φ12、φ16、φ25 mm TC4 钛合金棒材的超声声速。从表4可以看出，随着轧制变形量的增大，棒材超声声速逐渐降低。这是因为超声声速大小与弹性模量呈正相关，而弹性模量反映材料的原子间结合力，受α/β相含量和形态的影响<sup>[6]</sup>。随着轧制变形量的增大，TC4 钛合金棒材α/β相含量无明显变化，但纵向α相拉长程度逐渐增强，弹性模量逐渐降低，超声声速也逐渐降低<sup>[13-14]</sup>。

表4 940 °C下轧制的不同规格 TC4 钛合金棒材超声声速

Table 4 Ultrasonic velocity of different specification TC4 titanium alloy bars rolled at 940 °C

Finished spec/mm	Rolling degree/%	Ultrasonic velocity/mm·s <sup>-1</sup>
φ12	92.89	6093
φ16	87.36	6126
φ25	69.14	6136

### 2.1.2 轧制温度的影响

图3是经900、940、980 °C轧制的φ25 mm TC4 钛合金棒材横向与纵向显微组织，其超声声速如表5所示。从图3可以看出，随着轧制温度的升高，初生等轴α相含量逐渐降低，纵向拉长程度逐渐减弱，片层状次生α相逐渐析出，且厚度逐渐增大。轧制温度为900 °C时，棒材初生等轴α相含量超过70%，纵向α相基

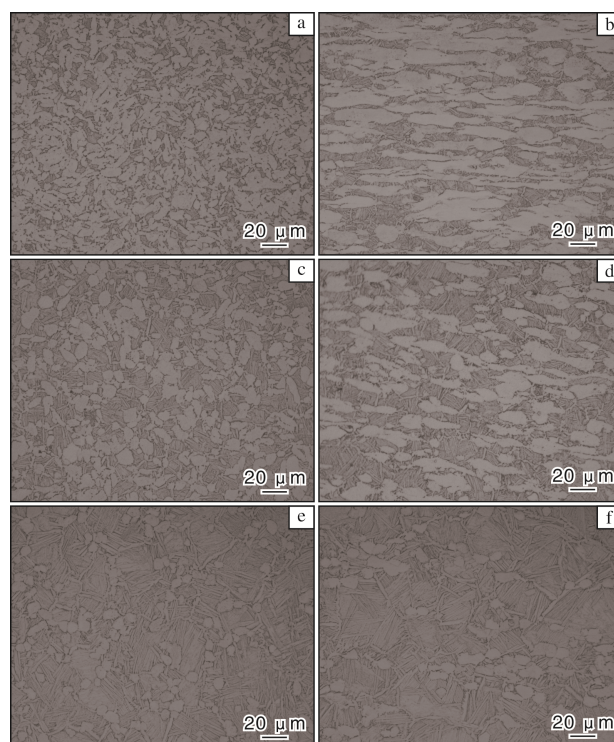


图3 不同温度轧制的φ25 mm TC4 钛合金棒材显微组织

Fig.3 Microstructures of φ25 mm TC4 titanium alloy bars under different rolling temperatures: (a) 900 °C, transverse; (b) 900 °C, longitudinal; (c) 940 °C, transverse; (d) 940 °C, longitudinal; (e) 980 °C, transverse; (f) 980 °C, longitudinal

本沿轧制方向呈拉长的流线分布;当轧制温度提高到940 °C时,初生等轴 $\alpha$ 相含量降低到30%~40%,纵向 $\alpha$ 相因相变和再结晶,沿轧制方向拉长程度明显减轻,等轴性明显提高;当轧制温度提高到980 °C时,初生等轴 $\alpha$ 相含量降低到15%以下且尺寸减小,纵向 $\alpha$ 相依然沿轧制方向分布,但基本呈等轴状形态。从表5可以看出,随着轧制温度的升高,棒材超声声速逐渐提高,从900 °C轧制时的6110 m/s逐渐提高到980 °C轧制时的6162 m/s,这是组织中 $\alpha$ 相含量减少和纵向等轴化综合作用的结果。 $\alpha$ 相属于密排六方结构,其弹性模量要高于体心立方结构的 $\beta$ 相,因此超声波在 $\alpha$ 相中的传播速度要快于 $\beta$ 相,即 $\alpha$ 相含量越高,超声波的传播速度越快<sup>[6-7]</sup>。故随着轧制温度的升高,初生 $\alpha$ 相含量逐渐降低,其超声声速理应逐渐降低。然而,弹性模量除了与 $\alpha/\beta$ 相含量有关外,也会受到 $\alpha$ 相晶体取向的影响,这是因为 $\alpha$ 相具有显著的各向异性,钛单晶垂直于基面方向的弹性模量为145 GPa,但平行于基面方向的弹性模量仅为100 GPa<sup>[13-14]</sup>。随着轧制温度的升高,纵向 $\alpha$ 相

拉长程度逐渐减弱,其弹性模量逐渐提高,且提高幅度大于因 $\alpha$ 相含量降低造成的弹性模量损失,二者综合作用导致棒材弹性模量逐渐提高,其超声声速逐渐提高。

表5 不同温度轧制的 $\phi 25$  mm TC4钛合金棒材超声声速  
Table 5 Ultrasonic velocity of  $\phi 25$  mm TC4 titanium alloy bars under different rolling temperatures

Finished spec/mm	Rolling temperature/°C	Ultrasonic velocity/m·s <sup>-1</sup>
$\phi 25$	900	6110
$\phi 25$	940	6136
$\phi 25$	980	6162

## 2.2 热处理对棒材超声声速的影响

### 2.2.1 固溶处理的影响

图4为940 °C轧制的 $\phi 25$  mm TC4钛合金棒材经HT1~HT4固溶处理后的显微组织,其超声声速如表6所示。从图4可以看出,经940、970 °C固溶处理后,棒材组织均为由一定量初生等轴 $\alpha$ 相+ $\beta$ 转变组织组成的双

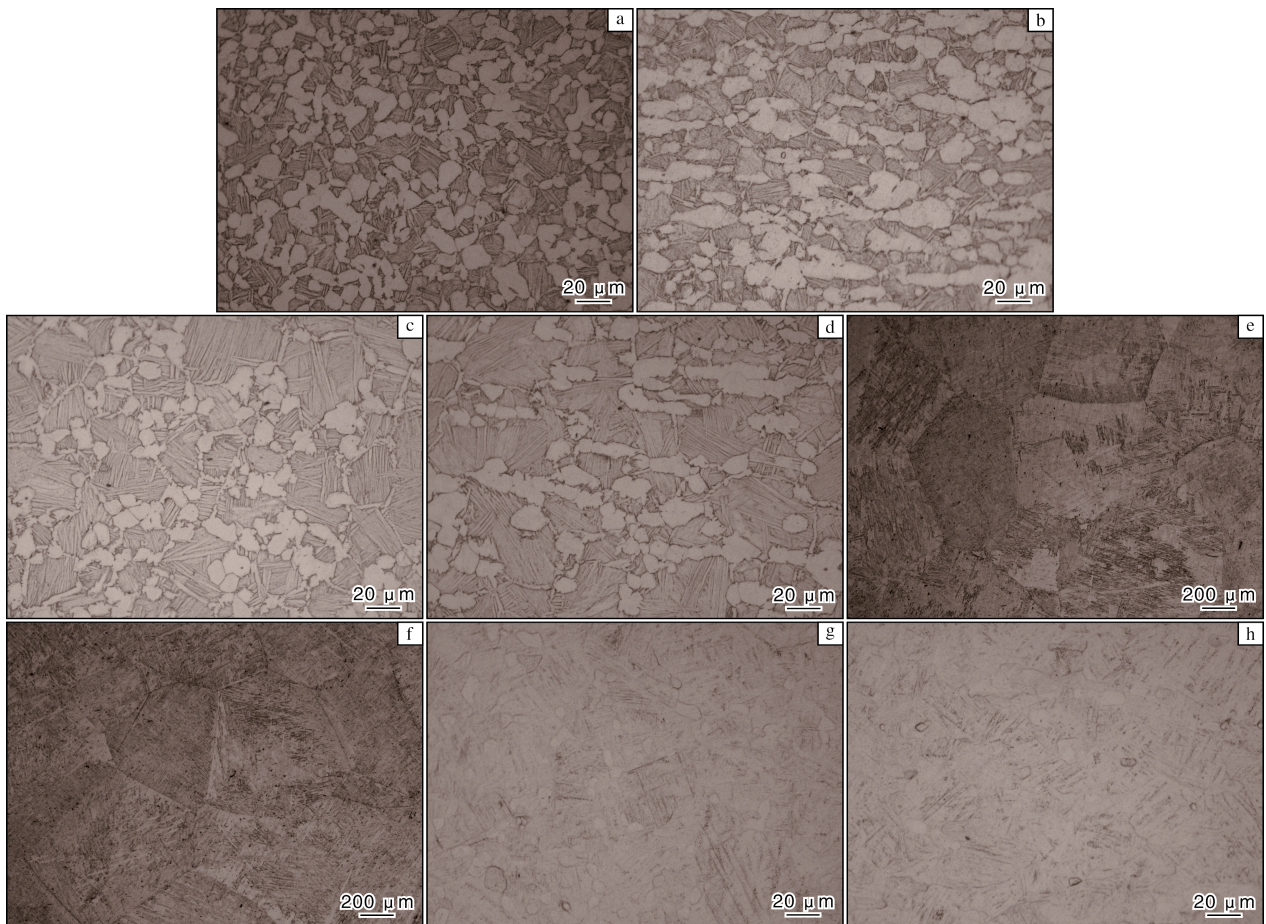


图4  $\phi 25$  mm TC4钛合金棒材经不同固溶处理后的显微组织

Fig.4 Microstructures of  $\phi 25$  mm TC4 titanium alloy bars after different solution treatments: (a) HT1, transverse; (b) HT1, longitudinal; (c) HT2, transverse; (d) HT2, longitudinal; (e) HT3, transverse; (f) HT3, longitudinal; (g) HT4, transverse; (h) HT4, longitudinal

态组织, 但经 970 °C 固溶处理后初生等轴  $\alpha$  相含量减少, 次生  $\alpha$  相含量增加, 且与轧制态组织相比纵向  $\alpha$  相的等轴性明显提高。当固溶温度继续提高到 1000 °C 时, TC4 钛合金棒材组织由双态组织转化为粗大  $\beta$  晶粒组成的魏氏组织, 由于棒材规格较小, 固溶冷却速度快, 无晶界  $\alpha$  相析出但晶界清晰且较为平直。图 4c、4d、4g、4h 分别是经 970 °C 固溶后空冷和水冷的横向与纵向显微组织, 可以看出不同固溶冷却方式下组织形态差异较大。固溶空冷后形成双态组织, 固溶水冷后的组织则是由少量未完全转变的等轴  $\alpha$  相 + 过冷马氏体 + 残留  $\beta$  相组成的。从表 6 可以看出, 在固溶空冷条件下, 随着固溶温度的升高, 棒材超声声速逐渐提高, 由 940 °C 固溶时的 6131 m/s 提高到 970 °C 时的 6140 m/s; 当固溶温度进一步升高到 1000 °C 时, 超声声速提高到 6170 m/s, 这与上文轧制温度提高时超声声速变化的趋势是一致的。

表 6  $\phi 25$  mm TC4 钛合金棒材经不同固溶处理后的超声声速  
Table 6 Ultrasonic velocity of  $\phi 25$  mm TC4 titanium alloy bars after different solution treatments

No.	Ultrasonic velocity/m·s <sup>-1</sup>
HT1	6131
HT2	6140
HT3	6170
HT4	6105

从表 6 还可以看出, 固溶水冷棒材的超声声速远低于固溶空冷棒材。这是因为钛合金快速冷却时形成了过冷马氏体和残留  $\beta$  相, 其中马氏体中的位错、孪晶等缺陷密度较高, 降低了原子间的结合力, 导致弹性模量降低, 同时水冷时残留的  $\beta$  相属于软性相, 在所有钛合金相中弹性模量最低<sup>[6]</sup>, 因而导致固溶水冷棒材的弹性模量明显降低, 超声声速低于空冷棒材。

### 2.2.2 时效处理的影响

图 5 是 940 °C 轧制的  $\phi 25$  mm TC4 钛合金棒材经 970 °C 固溶空冷或水冷 + 不同时效处理后的显微组织, 其超声声速如表 7 所示。从图 5 可以看出, 970 °C 固溶空冷棒材经 500、600、650 °C 3 种不同温度时效处理后, 初生等轴  $\alpha$  相的含量和形态变化不大, 但次生  $\alpha$  相的含量和形貌有一定差异。500 °C 时效处理时大量的次生  $\alpha$  相从  $\alpha/\beta$  相界、 $\beta$  晶界或  $\beta$  晶内高能缺陷处析出并逐渐长大呈集束状分布, 由于时效温度低, 驱动力大, 次生  $\alpha$  相含量较高。但当时效温度逐渐提高时, 次生  $\alpha$  相长大驱动力不足, 残留的  $\alpha$  稳定元素未完全析出并转变为次生  $\alpha$  相, 导致时效温度越高次生  $\alpha$  相含量越低。固溶水冷棒材经 500 °C 时效处理时, 马氏体组织逐渐分解形成极细小的次生  $\alpha$  相, 导致棒材弹性模量逐渐提高。

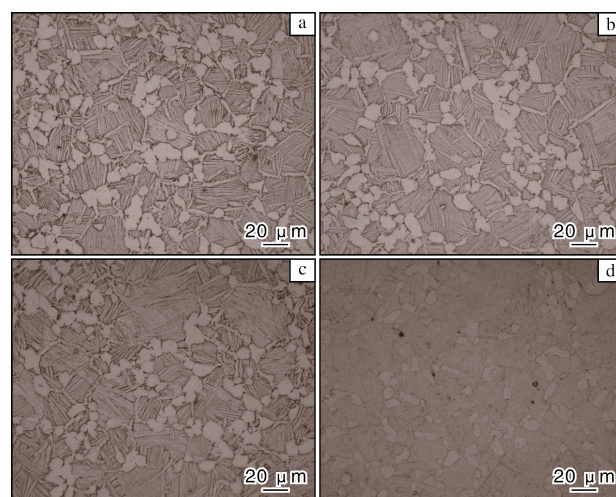


图 5  $\phi 25$  mm TC4 钛合金棒材经不同时效处理后的显微组织  
Fig.5 Microstructures of  $\phi 25$  mm TC4 titanium alloy bars after different aging treatments: (a) HT5; (b) HT6; (c) HT7; (d) HT8

表 7  $\phi 25$  mm TC4 钛合金棒材经不同时效处理后的超声声速  
Table 7 Ultrasonic velocity of  $\phi 25$  mm TC4 titanium alloy bars after different aging treatments

No.	Ultrasonic velocity/m·s <sup>-1</sup>
HT5	6170
HT6	6160
HT7	6145
HT8	6168

从表 7 可以看出, 相较于固溶处理, 经过时效处理后的 TC4 钛合金棒材超声声速都有所提高, 且时效温度越低超声声速提高越多。这是因为时效处理使得棒材固溶空冷过程中未完全析出的  $\alpha$  稳定元素以次生  $\alpha$  相的形态逐渐析出, 提高了整体的弹性模量, 进而提高了超声声速水平, 但时效温度提高会抑制次生  $\alpha$  相的析出, 从而导致超声声速提高幅度有限。固溶水冷棒材经时效处理后超声声速变化最明显, 从固溶时的 6105 m/s 提高到 6168 m/s, 这与固溶空冷 + 时效处理 (HT5) 的棒材超声声速水平相当。

### 2.2.3 三重热处理的影响

图 6 是 940 °C 轧制的  $\phi 25$  mm TC4 钛合金棒材经三重热处理后的显微组织, 其超声声速如表 8 所示。从图 6 可以看出, 与固溶 + 时效后的组织相比, 经三重热处理后的组织是由一定量的初生等轴  $\alpha$  相 + 粗的次生片层  $\alpha$  相 + 片层  $\alpha$  相 + 片层  $\alpha$  相组成的三态组织构成, 且整体  $\alpha$  相含量更高, 次生片层  $\alpha$  相明显长大粗化, 故整体的弹性模量要高于固溶 + 时效组织, 导致棒材超声声速提高了 10~20 m/s。此外, 三重热处理时第一重固

溶冷却方式对最终组织形态和超声声速也有明显影响。固溶水冷棒材的等轴 $\alpha$ 相含量与固溶空冷基本相当,但次生 $\alpha$ 相分布更加混乱且更多更细,导致其超声声速比固溶空冷棒材高出10 m/s。这是因为970 °C固溶水冷形成了过冷马氏体,同时组织中积累了大量的位错和层错能,导致在第二重930 °C热处理时由于次生 $\alpha$ 相的形核位置多且长大驱动力大,析出了大量混乱交织的次生 $\alpha$ 相,在第三重500 °C时效处理时残留的 $\alpha$ 稳定元素以极细的“三生” $\alpha$ 相形态逐渐析出,导致整体 $\alpha$ 相含量高于固溶空冷棒材,因而固溶水冷棒材超声声速较高。

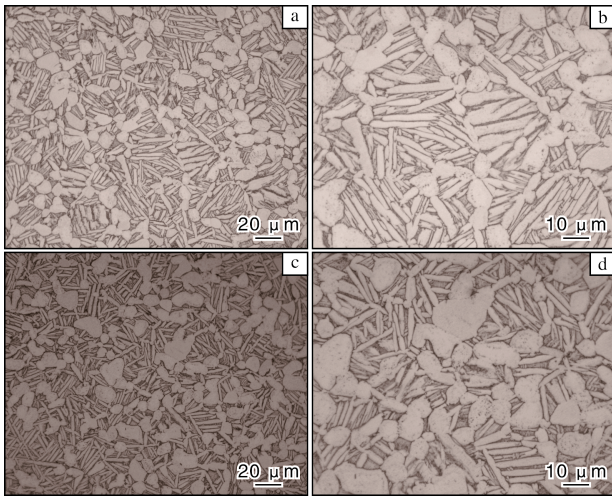


图6  $\phi 25$  mm TC4钛合金棒材经三重热处理后的显微组织  
Fig.6 Microstructures of  $\phi 25$  mm TC4 titanium alloy bars after triple heat treatments: (a, b) HT9; (c, d) HT10

表8  $\phi 25$  mm TC4钛合金棒材经三重热处理后的超声声速  
Table 8 Ultrasonic velocity of  $\phi 25$  mm TC4 titanium alloy bars after triple heat treatments

No.	Ultrasonic velocity/m·s <sup>-1</sup>
HT9	6180
HT10	6190

从以上研究可以看出,轧制和热处理工艺都对TC4钛合金棒材超声声速有明显的影响,为获得理想的超声声速,可以通过调整轧制或热处理工艺参数来实现。例如要获得较高的超声声速,可以通过高温小变形量轧制结合三重热处理来实现。

### 3 结论

(1) 轧制温度和轧制变形量对TC4钛合金棒材超声声速影响很大,当轧制温度从900 °C升高到980 °C时,超声声速从6110 m/s提高到6162 m/s,当轧制变形量从69.14%增加到92.89%时,超声声速从6136 m/s降

低到6093 m/s。

(2) 随着固溶温度的升高和时效温度的降低,TC4钛合金棒材的超声声速逐渐升高。当固溶温度在970 °C,时效温度在500 °C时,经固溶时效热处理后超声声速最高可达6170 m/s左右。

(3) 与固溶时效处理相比,经三重热处理后TC4钛合金棒材的超声声速更高,最高可达6190 m/s,第一重热处理采用水冷的棒材最终超声声速高于采用空冷的棒材。

(4) 通过调整轧制和热处理工艺参数,可以实现TC4钛合金棒材超声声速的控制。

### 参考文献 References

- [1] 蔡建明,曹春晓.航空发动机钛合金材料与应用技术[M].北京:冶金工业出版社,2021.
- [2] 孙纯纯,郭志君,张金勇,等.亚稳 $\beta$ 钛合金在生物医学领域的研究进展[J].稀有金属材料与工程,2022,51(3):1111-1124.
- [3] 叶建华,李东煜,林佳,等.TC4钛合金负泊松比人工骨微结构的力学性能匹配研究[J].稀有金属材料与工程,2022,51(12):4594-4601.
- [4] 孟凡玲,张弛,柏春光,等.弹性模量对TC4超声刀变幅杆性能影响的模拟[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2022,40(4):368-372.
- [5] 陈颖,罗晓宁,史文勇,等.超声手术刀的研制现状与应用[J].生物医学工程学,2005,22(2):377-380.
- [6] 刘俐.钛合金显微组织对其超声参量及耐腐蚀性能的影响[D].南昌:南昌航空大学,2011.
- [7] 郑念庆,杨晋,王建国,等.Ti6Al4V合金显微组织对超声声速结果的影响[J].金属热处理,2015,40(8):59-63.
- [8] 时靖,刘柯,鄢冠华,等.锻造参数对TC4锻件的组织和超声声速的影响[J].无损检测,2017,39(10):24-27.
- [9] 李运,韩飞孝,秦立东,等.加工工艺对Ti7Al4Mo合金棒材组织性能和超声声速的影响[J].钛工业进展,2022,39(6):18-23.
- [10] 石李祯,傅莉,林建国,等.高压时效 $\beta$ 钛合金的微观组织演化及动力学分析[J].稀有金属材料与工程,2022,51(6):2090-2096.
- [11] 樊永霞,张学哲,贾亮. $\beta$ 热处理对SEBM Ti-6Al-4V Diamond点阵材料显微组织和力学性能的影响[J].钛工业进展,2022,39(3):17-21.
- [12] 侯红苗,秦成,潘浩,等.超低间隙TC4-DT钛合金厚板显微组织与力学性能研究[J].钛工业进展,2022,39(5):1-5.
- [13] 毛江虹,杨晓康,罗斌莉.Fe元素对TC4ELI合金力学性能的影响[J].金属热处理,2019,44(6):95-99.
- [14] 赵洪波,郭广平,鄢冠华.立方晶系单晶材料晶体取向对纵波声速的影响[J].失效分析与预防,2010,5(2):65-69.