

## 冷却速率对 Ti-5.8Al-3Mo-1Cr-2Sn-2Zr-1V-0.15Si 合金组织及性能的影响

宋 淼, 马英杰, 邬 军, 李玉兰, 刘羽寅, 雷家峰

(中国科学院 金属研究所 钛合金研究部, 沈阳 110016)

**摘 要:** 通过金相显微术、SEM 和 TEM 等分析测试方法研究了固溶时效处理制度中固溶后冷却速率对 Ti-5.8Al-3Mo-1Cr-2Sn-2Zr-1V-0.15Si 合金显微组织及力学性能的影响。结果显示: 随着固溶后冷却速度的降低,  $\beta$  相中  $\beta$  稳定元素含量逐渐升高,  $\alpha$  相稳定元素含量逐渐下降, 对次生  $\alpha$  相的析出阻力变大, 故后继时效析出的次生  $\alpha$  相尺寸减小。同时, 固溶后合金的初生  $\alpha$  相板条宽度增加, 可观测到的  $\beta$  相逐渐减少。冷却速度影响合金力学性能的原因在于合金中初生  $\alpha$  相, 次生  $\alpha$  相,  $\beta$  相的比例和形貌的改变。

**关键词:** 钛合金; 显微组织; 冷却速率; 拉伸性能

**中图分类号:** TF 804.3

**文献标志码:** A

## Effect of cooling rate on microstructure and properties of Ti-5.8Al-3Mo-1Cr-2Sn-2Zr-1V-0.15Si alloy

SONG Miao, MA Ying-jie, WU Jun, LI Yu-lan, LIU Yu-yin, LEI Jia-feng

(Titanium Alloys Division, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** The effect of cooling rate after solution treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti-5.8Al-3Mo-1Cr-2Sn-2Zr-1V-0.15Si alloy was studied by the OM, SEM and TEM. It is found that as the cooling rate decreases, the  $\beta$  stabilizers increase and the  $\alpha$  stabilizers decrease in the  $\beta$  phase, thus the precipitation of second  $\alpha$  phase becomes difficult during sequent aging, and the precipitated second  $\alpha$  phase becomes small. At the same time, the lamellar of primary  $\alpha$  becomes coarse, and the amount of  $\beta$  phase decreases. The effect of cooling rate on the mechanical properties lies in the change of the amount and pattern of primary  $\alpha$  phase, secondary  $\alpha$  phase and  $\beta$  phase.

**Key words:** titanium alloy; microstructure; cooling rate; tensile property

随着损伤容限方法被广泛地接受, 具有高断裂韧性和低裂纹扩展速率的钛合金受到人们的重视<sup>[1]</sup>。目前, 国外已经研制出高断裂韧度、低裂纹扩展速率的损伤容限钛合金, 即低间隙 Ti-6Al-4V( $\beta$ -ELI)和 Ti-6-22-22S<sup>[2-3]</sup>。为了满足需求, 获得具有高强、高韧、高模量相结合的钛合金, 中国科学院金属研究所根据材料的晶体学理论设计了一系列( $\alpha$ + $\beta$ )两相钛合金。Ti-5.8Al-3Mo-1Cr-2Sn-2Zr-1V-0.15Si 合金是其中性能最好的一种, 在 50 kg 的铸锭条件下研究, 合金热处理后的室温力学性能为: 屈服强度 $\sigma_{0.2}$  1 050 MPa, 抗拉强度 $\sigma_b$  1 150 MPa, 伸长率 $\delta$  10%, 断面收缩率 $Z$  18%, 断裂韧性  $K_{IC}$  72 MPa·m<sup>1/2</sup>。合金的铝当量

为 10.47, 钼当量为 5.38,  $\beta$  稳定化系数为 0.51。为了满足棒材的工程应用, 研究合金冷却速度对力学性能的影响十分必要。本文作者主要研究合金经过( $\alpha$ + $\beta$ )两相区上部固溶后不同的冷却速率下显微组织和相组成的变化, 再经过两相区下部时效后显微组织的变化, 以及此过程中合金拉伸性能的变化。

## 1 实验

选用零级海绵 Ti、海绵 Zr、Al 豆和中间合金, 采用 ZHT-650 真空自耗电弧炉经 3 次熔炼得到铸锭。

金相法测得的 $(\alpha + \beta)/\beta$ 相变点为 953 左右。铸锭经过 $\beta$ 单相区锻造开坯,再经 $(\alpha + \beta)$ 两相区锻造及 $\beta$ 单相区墩饼得 $d$  300 mm 的饼材。其化学成分如表 1 所示。

表 1 实验用合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of alloy tested (mass fraction, %)

Al	Mo	Cr	Sn	Zr	V
5.71	2.99	1.01	1.96	1.99	1.02
Si	O	N	H	Ti	
0.15	0.072	0.009 6	0.001 3	Bal.	

合金的热处理方案包括以下两步:1) 920 固溶 0.5 h,之后按水冷(WQ),空冷(AC),炉冷(FC) 3 种冷却方式冷却;2) 在 540 时效 8 h,空冷。

将热处理后的合金加工成 M10 mm×5 mm,标距为 30 mm,总长为 55 mm 的圆棒状拉伸试样。单向拉伸试验在 AG-100kNG 实验机上室温下完成,屈服前、后的应变速率分别为  $5.56 \times 10^{-4}$ 、 $27.78 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

微观组织观察分别在 Zeiss-Axiover200MAT 金相显微镜,带有 Oxford 能谱分析的 S-3400N Hitachi 扫描电镜和 FEI Tecnai G<sup>2</sup> 20 透射电镜上完成,物相分析在 Rigaku D/max-2400PC X 射线衍射仪上用 Cu K $\alpha$ 衍射进行,并以 4 (°)/min 的扫描速度进行。

2 结果与分析

2.1 冷却方式对 Ti-5.8Al-3Mo-1Cr-2Sn-2Zr-1V-0.15Si 合金显微组织和相组成的影响

图 1 和图 2 分别给出了固溶后不同的冷却方式对合金的相组成和显微组织的影响。从图 1 可以看出:在 920 固溶 0.5 h 后水淬,合金中除了产生初生 $\alpha$ 相之外,还产生了 $\alpha''$ 马氏体。这是由于 $\beta$ 相在快冷时不能通过扩散转变成平衡的 $\alpha$ 相,而合金中的 $\beta$ 相稳定元素含量又不足以使所有的高温 $\beta$ 相保留到室温, $\beta$ 相中的

原子只能通过集体有规则的近程迁移,发生切变形成溶质元素过饱和的马氏体 $\alpha''$ ,其通常为针状,具有较大的纵横比。然而,在本合金中其与初生 $\alpha$ 相在形貌上较难区别开来,因为某些经过热加工变形的初生 $\alpha$ 相也可能具有较大的纵横比。

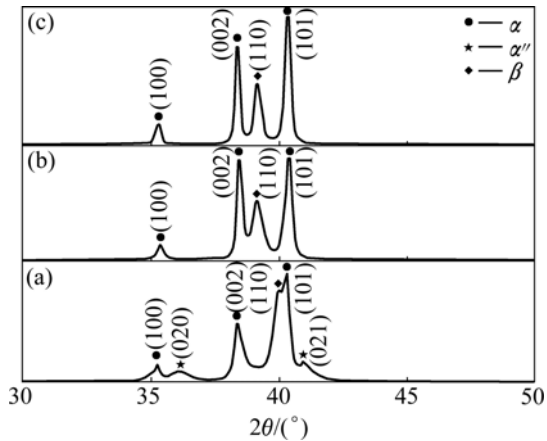


图 1 920 固溶后采用不同冷却方式得到的合金的相组成  
Fig.1 Phase constitutions of samples with different cooling styles after solution treatment at 920 : (a) Water quenching; (b) Air cooling; (c) Furnace cooling

从图 1 还可以看出:随着冷却速度的降低,合金的 $\beta$ 相的(110)衍射峰发生变化,反映出来的是 $\beta$ 相的晶胞参数的变化,本质的原因是构成 $\beta$ 相的化学成分发生了变化。能谱结果(表 2)显示:随着冷却速度的降低, $\beta$ 相中的 V, Mo 和 Cr 元素含量逐渐上升,Al 和 Ti 含量逐渐下降;同时,随着固溶后冷却速度的降低, $\alpha''$ 相不再产生,固溶后的合金由 $\alpha$ 和 $\beta$ 两相构成。从图 2 可以看出:随着固溶冷却速度的降低,合金的初生 $\alpha$ 相板条宽度增加,部分初生 $\alpha$ 相发生等轴化, $\beta$ 相逐渐减少。

2.2 后继时效对合金显微组织和相组成的影响

图 3 所示为时效后合金的相组成。可见:固溶水

表 2 不同冷却速率对合金中的 $\beta$ 相的化学成分的影响

Table 2 EDS results of  $\beta$  phase after different cooling rate of solution treatment (mass fraction, %)

Cooling style	Al	Si	V	Cr	Zr	Mo	Sn	Ti
Water quenching	5.82	0.18	0.12	1.04	2.42	2.57	2.16	85.7
Air cooling	5.29	0.19	0.61	1.21	2.20	3.63	1.90	84.97
Furnace cooling	4.61	0.1	1.08	2.11	2.60	7.10	1.88	80.51

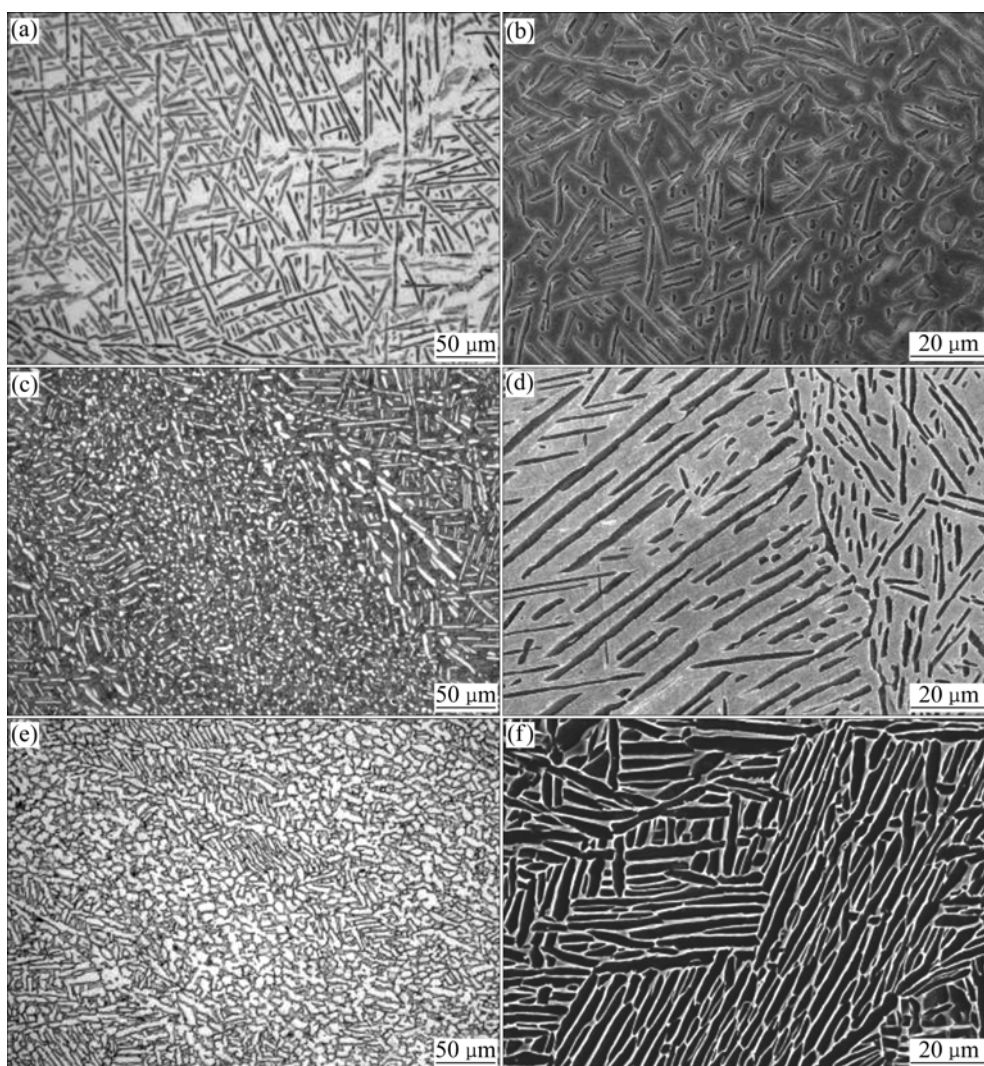


图 2 920 固溶后的冷却方式对合金的显微组织的影响

**Fig.2** Effect of cooling rate after solution treatment on microstructure of samples: (a), (b) Water quenching; (c), (d) Air cooling; (e), (f) Furnace cooling

冷后产生的 $\alpha''$ 相马氏体经过时效后完全分解;同时,合金中未分解的 $\beta$ 相的比例逐渐升高。从图 4、图 5 可以看出:经时效后,合金中产生大量的次生 $\alpha$ 相。从 TEM 形貌来看,随着固溶冷却速率的降低,后续时效产生的次生 $\alpha$ 相尺寸逐渐减小。这可能是由于随着固溶后冷却速率的降低,合金中的 $\beta$ 相的稳定元素含量逐渐升高, $\alpha$ 稳定元素逐渐减少,对次生 $\alpha$ 相的析出阻力变大,析出的次生 $\alpha$ 相尺寸变小。

### 2.3 热处理对合金力学性能的影响

表 3 所示为合金经过不同热处理后的拉伸性能。固溶水冷后合金的屈服强度较低,其应力—应变曲线显示样品出现了双屈服现象。经时效后,随着固溶冷却速率的降低,材料的强度逐渐降低,塑性逐渐上升,时

效强化效果变得显著。合金的力学性能由初生 $\alpha$ 相、次生 $\alpha$ 相, $\beta$ 相的相对比例变化及形态变化决定。固溶水冷的样品经时效后,残余 $\beta$ 相含量最少,初生 $\alpha$ 相板条最细、含量最少,次生 $\alpha$ 则较粗大、比例最高,其抗拉强度最大,韧性最低;而固溶炉冷的样品经时效后,残余 $\beta$ 相含量最高,初生 $\alpha$ 相板条最宽、含量最多,次生 $\alpha$ 则较细、比例最少,其抗拉强度最低,韧性最高;固溶后空冷的样品经时效后性能则介于两者之间。后续时效的强化效果与 $\beta$ 相分解比例和次生 $\alpha$ 的比例和形貌密不可分,残余 $\beta$ 相越少,次生 $\alpha$ 的比例越高,则合金时效强化效果越显著,同时塑性降低也越多。冷却速度影响合金的力学性能的原因在于改变合金中初生 $\alpha$ 相,次生 $\alpha$ 相, $\beta$ 相的相对比例和形貌。

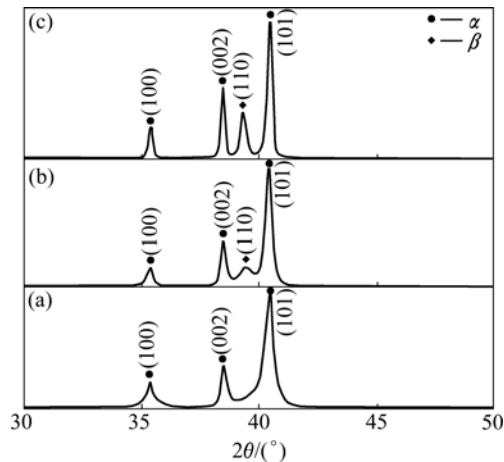


图 3 固溶时效处理后合金的相组成

**Fig.3** Phase constitution of samples after solution and aging treatment: (a) Water quenching; (b) Air cooling; (c) Furnace cooling

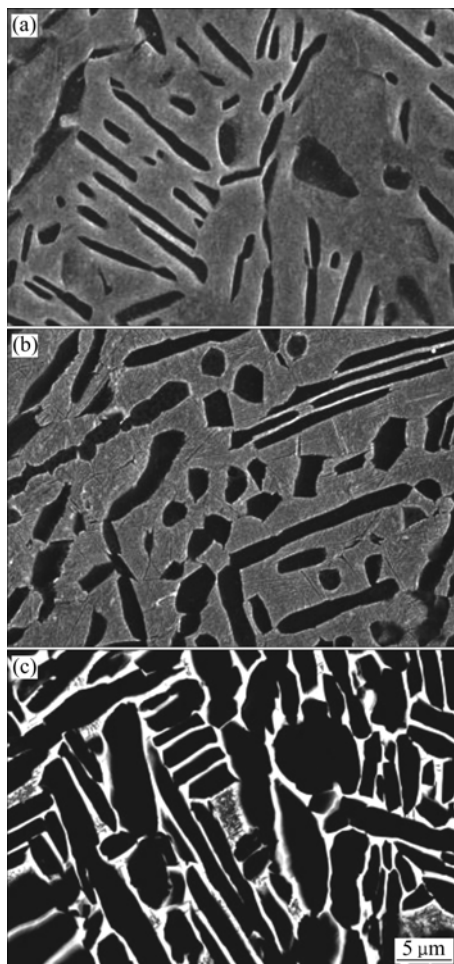


图 4 固溶时效处理后合金的 SEM 像

**Fig.4** SEM images of samples after solution and aging treatment: (a) Water quenching; (b) Air cooling; (c) Furnace cooling

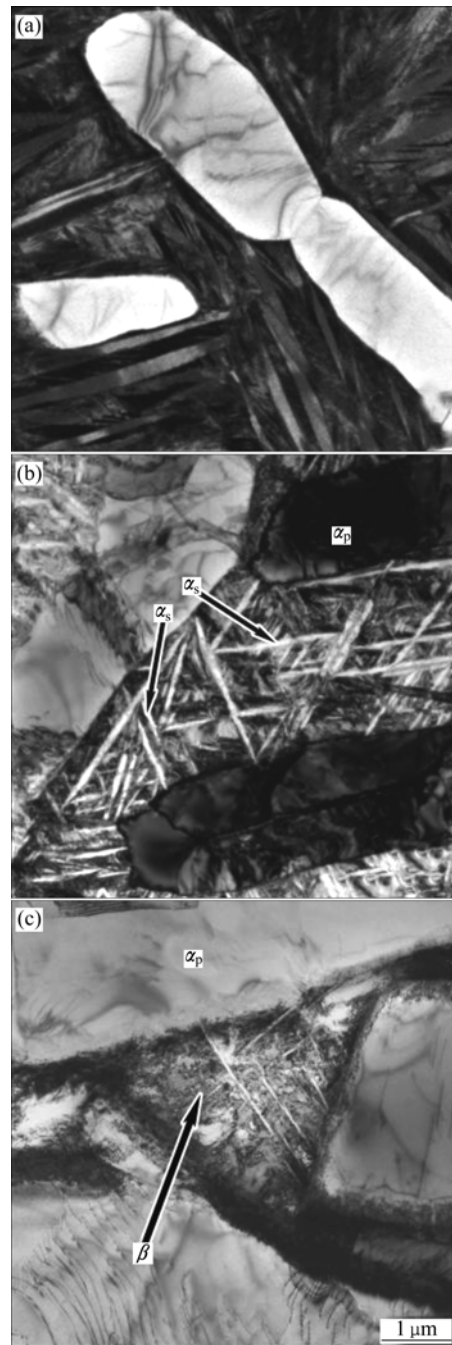


图 5 固溶时效处理后合金的 TEM 像

**Fig.5** TEM images of samples after solution and aging treatment: (a) Water quenching; (b) Air cooling; (c) Furnace cooling

3 结论

1) 随着固溶冷却速度的降低, β相中的 V, Mo 和 Cr 元素含量逐渐升高, Al 和 Ti 含量逐渐下降。同时, 合金的初生 α 相板条宽度增加, β 相逐渐减少。

表 3 热处理后合金的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of alloy after heat treatment

Heat treatment	$R_{p0.2}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %	$Z/$ %
Water quench after solution	545	1170	11.67	16
Air cooling after solution	1060	1186.7	10.17	24.5
Furnace cooling after solution	946.7	1006.7	16.5	39.8
Water cooling+Aging	1449.8	1587.2	1.73	/
Air cooling+Aging	1155.2	1262.2	10.0	24.9
Furnace cooling+Aging	961.1	1021.8	17.3	37.5

Solution treatment: 920℃, 0.5 h; Aging: 540℃, 8 h.

2) 固溶后冷却速率的降低,合金中的 $\beta$ 相的 $\beta$ 稳定元素含量逐渐变高,对次生 $\alpha$ 相的析出阻力变大,固溶后时效析出的次生 $\alpha$ 相尺寸减小。

3) 冷却速度影响合金的力学性能的原因在于改变合金中初生 $\alpha$ 相,次生 $\alpha$ 相, $\beta$ 相的比例和形貌。

REFERENCES

[1] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(增 1): 4-11.  
CAO Chun-xiao. Change of material selection criterion and development of high damage-tolerant titanium alloy [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2002, 38(s1): 4-11.

[2] 付艳艳, 宋月清, 惠松骁, 米绪军. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属, 2006, 30: 850-855.  
FU Yan-yan, SONG Yue-qing, HUI Song-xiao, MI Xu-jun. Progress of research and application of titanium alloys in aerospace field [J]. Rare Metals, 2006, 30: 850-855.

[3] WOOD J R, RUSSO P A, WELTER M F, CRIST E M. Thermomechanical processing and heat treatment of Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-Si for structure application [J]. Material Science and Engineering A, 1998, 243: 109-118.

(编辑 杨 兵)