

Ti-6554 钛合金的 TTT 曲线测定

李成林, 于 洋, 惠松晓, 付艳艳

(北京有色金属研究院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

摘 要: 采用金相法测定了 Ti-6554 钛合金的 TTT 曲线。结果表明: 测得等温转变的“鼻温”在 540 左右, 在此温度时效时, α 相析出速度最快, 仅需 5 min。另外, 该合金的时效响应快, 在 480~600 时效时, α 相从亚稳 β 相中析出的开始时间均少于 30 min。

关键词: 钛合金; 金相法; TTT 曲线

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

Determination of TTT curve of Ti-6554 titanium alloy

LI Cheng-lin, YU Yang, HUI Song-xiao, FU Yan-yan

(State Key Laboratory of Fabrication and Processing for Nonferrous Metals,
General Research Institute for Non-ferrous Metal, Beijing 100088, China)

Abstract: Metallographic method was used for the determination of TTT curve of Ti-6554 titanium alloy. The results show that the ‘nose’ temperature of isothermal transformation is about 540 . When the alloy is aged at 540 , α phase precipitates fastest, and only 5 min is needed. Moreover, this alloy has fast aging response. When the alloy is aged at 480~600 , the beginning time of α phase precipitated from metastable β phase is less than 30 min.

Key words: titanium alloy; metallographic method; isothermal transformation

钛及钛合金的比强度、比刚度高, 抗腐蚀性能、室温高温力学性能、抗疲劳和蠕变性能优良, 是一种很有发展潜力和应用前景的结构材料。近年来, 钛材加工技术得到了飞速发展, 钛合金的生产和消费都达到了很高的水平, 在航空航天、舰艇船舶及兵器等领域的应用日益广泛, 在汽车、化学和能源等行业也有着巨大的应用潜力^[1-6]。

Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al 合金是中国宝钛集团最新研发的一种亚稳定 β 钛合金, 该合金按照多元强化及铝当量与钼当量匹配的原则进行设计。在本研究中, 作者采用金相法测定 Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al 合金的 TTT 曲线。

1 实验

实验材料为 Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al 钛合金, 采用真空自耗电弧二次熔炼, 铸锭经开坯、锻造、轧制得到 $d16$ mm 棒材。采用淬火金相法测得该合金的 β 相转变温度为 780~790 。该合金的化学成分如表 1 所示。

采用金相法测定合金的 TTT 曲线。具体做法为: 将轧制态合金棒材经 800 固溶水淬后, 切割成 $d16$ mm $\times$ 2 mm 薄片试样, 分别在电阻炉里进行 400~600 , 25 min~24 h 时效处理, 如图 1 所示。沿横截面切

表 1 Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al alloy (mass fraction, %)

Cr	Mo	V	Al	Fe	Si	C	Ti
5.7	4.7	4.81	3.93	0.080	0.028	0.025	Bal.

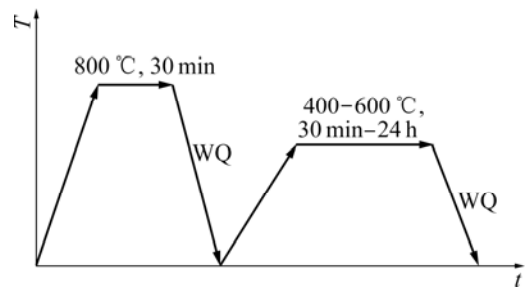


图 1 TTT 曲线测定方案

Fig.1 Method of determination of TTT curve

割成 $d\ 16\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ 的薄片，制成金相试样，观察试样中心处的显微组织，确定每个温度时效时， α 相开始从 β 相中析出的时间。金相腐蚀剂采用 $V(\text{HF})$: $V(\text{HNO}_3)$: $V(\text{H}_2\text{O})=1:3:7$ 配比溶液，显微组织在 Axiovert200 MAT 光学显微镜下观察。

2 结果与分析

2.1 β 区固溶淬火后的组织

Ti-6554 合金经 800 °C，30 min 固溶水淬后的显微组织为单一的等轴状 β 相，晶粒尺寸在 50 μm 左右，如图 2 所示。该 β 相为一种非平衡组织，也称为亚稳 β 组织。亚稳 β 组织与平衡状态的 $\alpha+\beta$ 组织在成分上存在差异，因此提供了等温转变的化学驱动力；另一方面， β 相向 α 相转变时，体积会发生变化，产生的

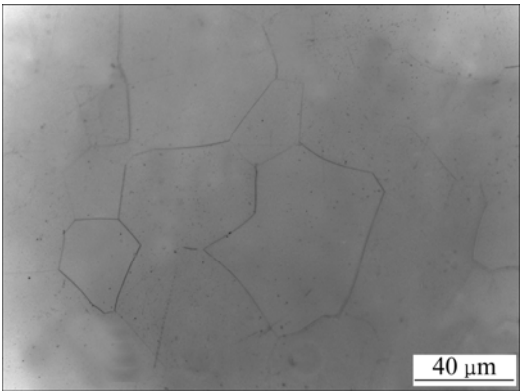


图 2 Ti-6554 合金经 800 °C，30 min 固溶水淬处理后的显微组织

Fig.2 Microstructure of Ti-6554 alloy after solution treatment (800 °C，30 min) and water quenching

体积应变又为等温转变提供了力学驱动力。

2.2 等温转变时的组织变化

Ti-6554 合金在 400~600 °C 时效后的典型组织如图 3~11 所示。时效过程析出的次生 α 相呈细小的粒状，首先在晶界处析出，然后在晶内析出。因为晶界处的能量高， α 相优先在晶界处析出。

2.3 等温转变曲线

根据图 3~11 的显微组织照片，得到每一温度时效时 α 相开始析出的时间，拟合后得到 Ti-6554 合金的 TTT 曲线，如图 12 所示。

TTT 曲线可综合反映 α 相在不同温度下从亚稳 β 相中析出的等温转变过程，即转变温度、转变开始时间、转变量三者之间的关系。由图 12 可见，Ti-6554 合金等温转变 TTT 曲线的“鼻温”在 540 °C 左右，也就

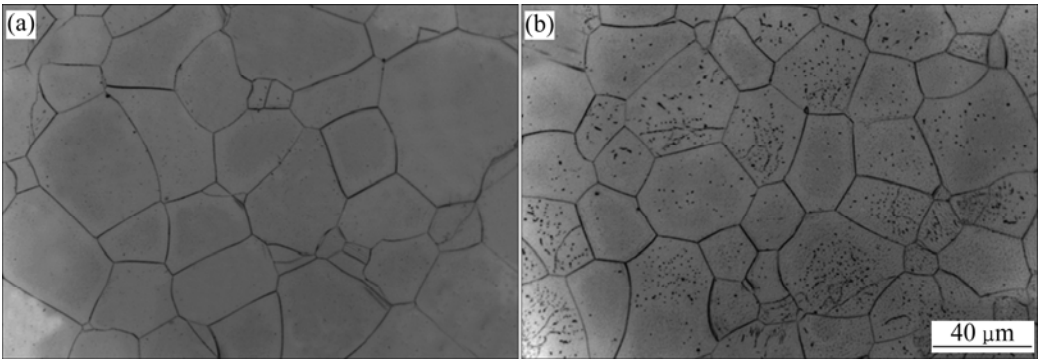


图 3 Ti-6554 合金在 400 °C 时效不同时间后的显微组织

Fig.3 Microstructures of Ti-6554 alloy aged at 400 °C for different time: (a) 20 h; (b) 24 h

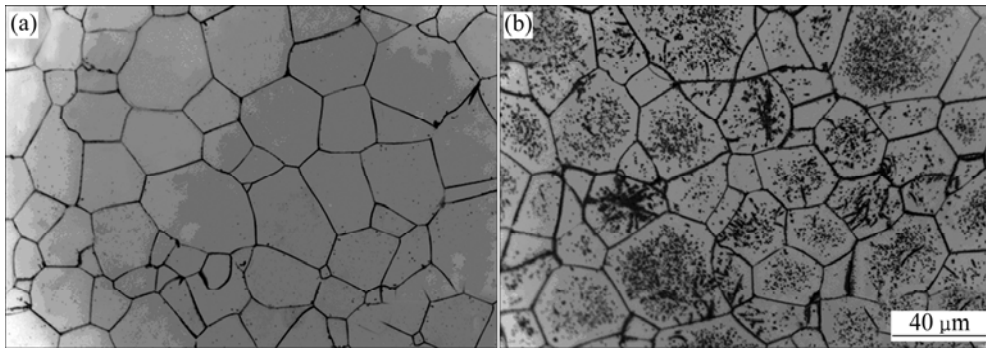


图 4 Ti-6554 合金在 450 °C 时效不同时间后的显微组织

Fig.4 Microstructures of Ti-6554 alloy aged at 450 °C for different time: (a) 20 h; (b) 24 h

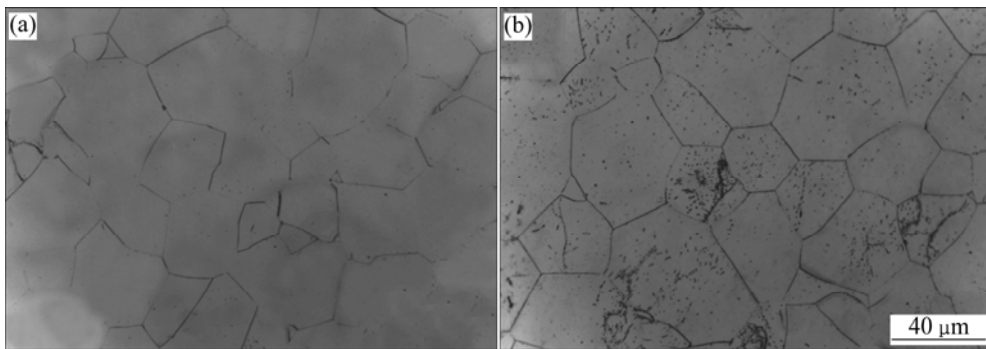


图 5 Ti-6554 合金在 480 °C 时效不同时间后的显微组织

Fig.5 Microstructures of Ti-6554 alloy aged at 480 °C for different time: (a) 20 min; (b) 25 min

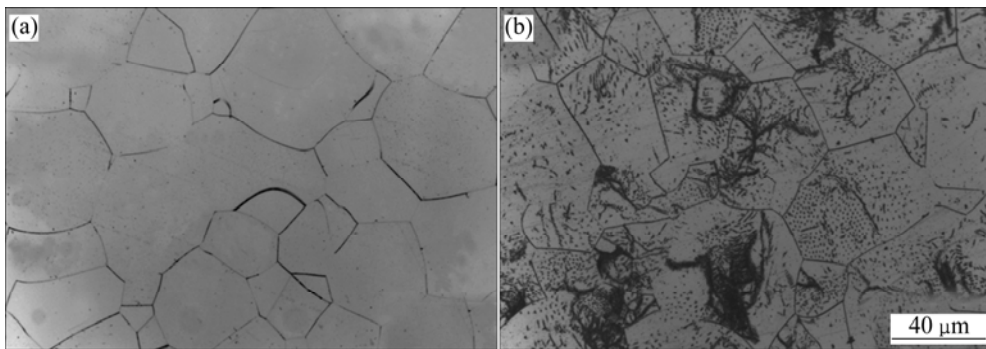


图 6 Ti-6554 合金在 500 °C 时效不同时间后的显微组织

Fig.6 Microstructures of Ti-6554 alloy aged at 500 °C for different time: (a) 15 min; (b) 30 min

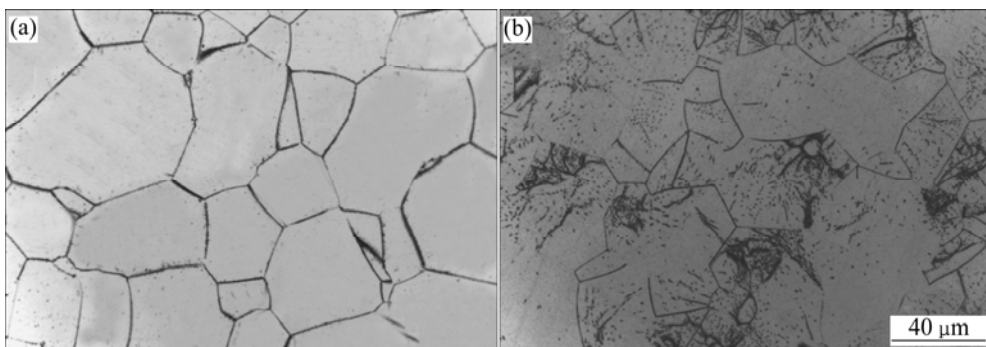


图 7 Ti-6554 合金在 520 °C 时效不同时间后的显微组织

Fig.7 Microstructures of Ti-6554 alloy aged at 520 °C for different time: (a) 5 min; (b) 15 min

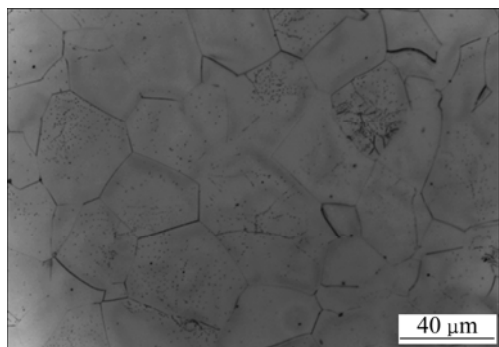


图 8 Ti-6554 合金在 540 °C 时效 5 min 后的显微组织

Fig.8 Microstructure of Ti-6554 alloy aged at 540 °C for 5 min

是说,在该温度附近, α 相的析出速度最快,仅需 5 min。对于钛合金来说, α 相的析出速度与相变驱动力密切相关^[7]。在高温时,时效温度比较接近合金的相变转变温度,虽然溶质原子扩散速度较快,但相变驱动力不足,因而 α 相析出速度较慢;在低温时效时,虽然相变驱动力大,但溶质原子扩散速度较慢, α 相析出速度也较慢;当合金在 540 °C 左右时效时,相变驱动力和溶质原子扩散速度对 α 相析出的作用达到最佳配合,因此 α 相的析出速度达到最快。

另外,合金在 480~600 °C 时效时, α 相从亚稳 β 相中析出的开始时间均少于 30 min,在 540 °C 左右时效时,仅需 5 min 左右,说明该合金的时效响应快。

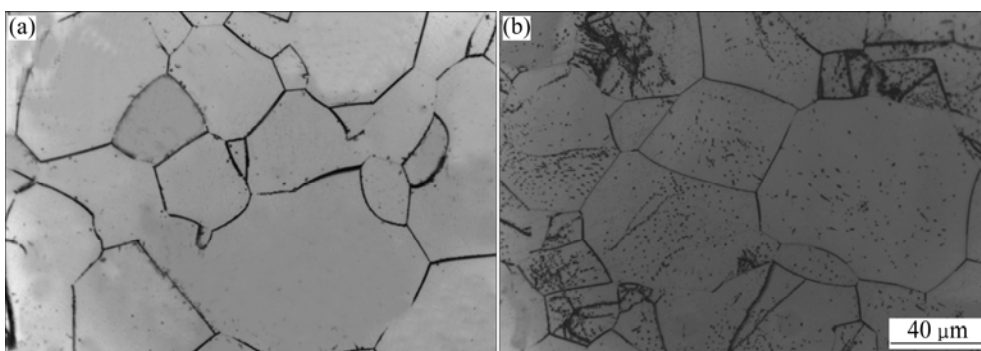


图 9 Ti-6554 合金在 550 °C 时效不同时间后的显微组织

Fig.9 Microstructures of Ti-6554 alloy aged at 550 °C for different time: (a) 5 min; (b) 10 min

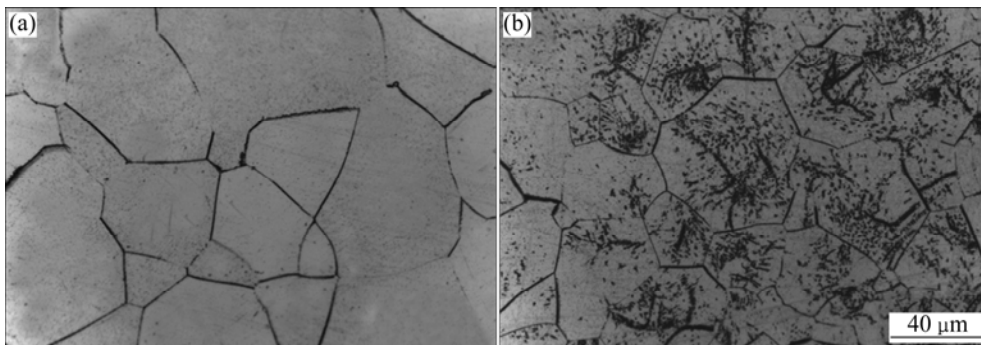


图 10 Ti-6554 合金在 580 °C 时效不同时间后的显微组织

Fig.10 Microstructures of Ti-6554 alloy aged at 580 °C for different time: (a) 15 min; (b) 25 min

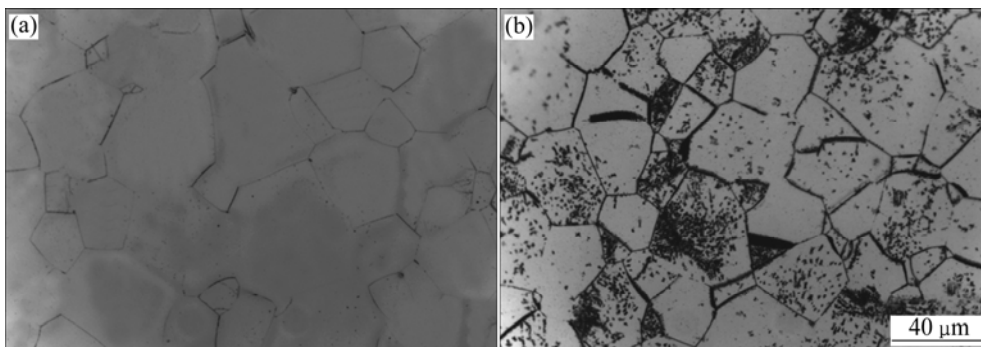


图 11 Ti-6554 合金在 600 °C 时效不同时间后的显微组织

Fig.11 Microstructures of Ti-6554 alloy aged at 600 °C for different time: (a) 20 min; (b) 30 min

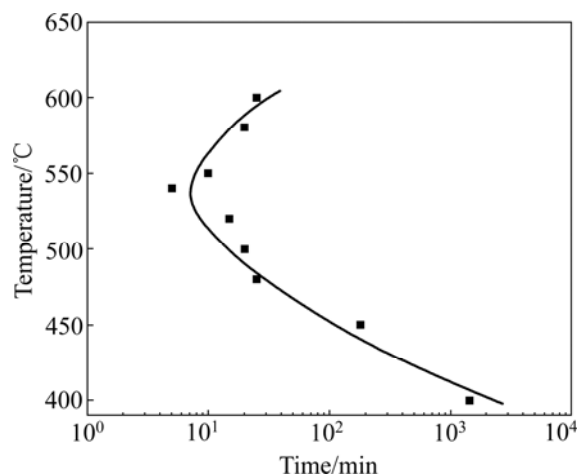


图 12 Ti-6554 合金的 TTT 曲线

Fig.12 TTT curve of Ti-6554 alloy

3 结论

1) 采用淬火金相法测得 Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al 钛合金的 TTT 曲线。等温转变的“鼻温”在 540 左右, α 相析出仅需 5 min。

2) Ti-6554 合金的时效响应快。合金在 480~600 时效时, α 相从亚稳 β 相中析出的开始时间均少于 30 min。

REFERENCES

- [1] 尤振平, 叶文君, 惠松晓. TB10 钛合金的动态力学性能及绝热剪切分析[J]. 稀有金属, 2008, 32(6): 799-802.
YOU Zhen-ping, YE Wen-jun, HUI Song-xiao. Study on dynamic mechanical properties and adiabatic shearing of TB10 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(6): 799-802.
- [2] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry [J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213: 103.
- [3] 姜贵涛. 钛合金的研究应用现状及其发展方向[J]. 钛工业进展, 2003(2): 9-13.
LOU Guan-tao. Development and tendency of titanium alloys [J]. Titanium Industry Progress, 2003(2): 9-13.
- [4] 邵娟. 钛合金及其应用研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2007, 35(4): 61-65.
SHAO Juan. Application and development of titanium alloys [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2007, 35(4): 61-65.
- [5] 付艳艳, 宋月清. β 钛合金的强韧化机制分析[J]. 稀有金属, 2009, 33(1): 92-95.
FU Yan-yan, SONG Yue-qing. Strength and fracture toughness of beta-titanium alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(1): 92-95.
- [6] LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [7] MALINOV S, SHA W, MARKKOVSKY P. Experimental study and computer modelling of the $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ phase transformation in $\beta 21s$ at isothermal conditions [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2003, 348: 110-118.

(编辑 杨兵)