

Ti-6554 钛合金的晶粒长大动力学

于 洋¹, 李成林¹, 惠松晓¹, 叶文君¹, 王伟琪², 张平辉², 羊玉兰²

(1. 北京有色金属研究总院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088;

2. 宝钛集团有限公司, 宝鸡 721014)

摘 要: 研究了 Ti-6554(Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al)合金在相变点以上的晶粒长大动力学。结果表明: 在 800 °C 固溶处理时, 随着固溶时间的延长, 晶粒的尺寸增加, 固溶时间超过 60 min 后, 晶粒长大速度加快。800 °C 时, 晶粒平均直径随时间的长大方程为 $\bar{D} = 6.16t^{0.5}$ 。固溶时间为 30 min 时, 随着固溶温度的升高, 合金的晶粒尺寸增大, 920 °C 固溶处理后, 晶粒明显粗化。在本研究的温度和时间范围内, 固溶温度对晶粒度的影响更为显著。

关键词: 钛合金; 固溶; 长大动力学

中图分类号: TG 116.23

文献标志码: A

Grain growth dynamics of Ti-6554 titanium alloy

YU Yang¹, LI Cheng-lin¹, HUI Song-xiao¹, YE Wen-jun¹, WANG Wei-qi², ZHANG Ping-hui², YANG Yu-lan²

(1. State Key Laboratory of Fabrication and Processing for Nonferrous Metals,

General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China;

2. Baoti Group. Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: The grain growth kinetics of Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al alloy solution treated above β transformation temperature was studied. The result indicates that, when the alloy is solution treated at 800 °C, grain size increases with solution time prolonging. Increasing velocity of grain size will be accelerated when solution time is more than 60 min. When the alloy is solution treated at 800 °C, the function of average grain diameter increasing with solution time is $\bar{D} = 6.16t^{0.5}$. When the alloy is solution treated for 30 min, grain size increases with solution temperature rising, and grain coarsening is obvious at 920 °C. For temperature and time range in this research, grain size is more sensitive to solution temperature.

Key words: titanium alloy; solution treatment; growth kinetics

Ti-6554(Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al)合金是根据多元强化及铝当量与钼当量匹配的原则研制成功的新型高强高韧钛合金。该合金的钼当量为 13.3, K_{β} 为 1.33, 可归类为亚稳定 β 钛合金。该合金加工性能好, 并且具有高强、高韧和优良的耐腐蚀性能^[1], 在航空、航天、石油化工、体育卫生等方面有着广泛的应用前景。

固溶处理可以有效减小或消除合金热加工过程中由于变形不均匀、冷却速度不同等造成的组织不均匀性。固溶温度和固溶时间对合金的相组成、分布、尺寸以及后续的时效响应有很大的影响。尽管升高加热温度和延长加热时间会使合金元素溶解更充分, 合金元素的

分布更均匀, 但温度过高或者加热时间过长会导致晶粒剧烈长大, 使合金的塑性降低。因此, 有必要对 Ti-6554 钛合金相变点以上晶粒长大动力学行为进行研究, 为确定固溶热处理制度提供依据。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为真空自耗电弧二次熔炼的 Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al(质量分数, %)合金铸锭, 经开坯、锻造、轧制

得到 $\phi 12$ mm 棒材。该合金的化学成分如表 1 所示。

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.

1.2 研究方法

采用淬火金相法对合金的相变点进行测试。根据相变点测试结果,在相变点以上 15~20 °C 进行固溶处理,处理时间为 15~120 min,研究固溶时间对合金晶粒度的影响规律。在相变点以上 10~150 °C 温度区间内每隔 30 °C 取一温度点,固溶处理 30 min,研究固溶温度对合金晶粒度的影响规律。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,金相分析在 Axiovert200 MAT 型 Zeiss 光学显微镜上进行。

2 结果与分析

2.1 相变点测试

将切好的金相试样在 770、780、790、800 °C 的

电阻炉中保温 30 min,取出迅速放入冷水中,转移时间不超过 2 s。以在合金水冷金相组织中看不到初生 α 相的最低水冷温度为 β 相转变温度。

图 1 所示为 Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al 轧制态合金经固溶处理和水冷后的金相组织。随着固溶温度的升高,晶界处和晶粒内部的初生 α 相逐渐减少,直至 790 °C,组织中的初生 α 相完全转变为等轴的 β 晶粒。据此判断, Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al 钛合金轧制态相变点在 780~790 °C。

2.2 固溶时间对合金晶粒度的影响规律

2.2.1 固溶时间与晶粒度的关系

在 800 °C 进行 15~120 min 的固溶处理,冷却方式均为空冷。对固溶处理后的试样进行金相组织观察,结果见图 2。对合金的晶粒尺寸进行测量,随机选取 100 个晶粒测量其直径,测量结果见图 3。

从图 2 可以看出,经过相变点以上固溶处理后,合金发生了再结晶并获得单一的 β 相。同一固溶时间下合金的晶粒尺寸分布不均匀,从几微米到几十微米甚至上百微米。 β 晶粒尺寸随着固溶时间的不同有所变化,固溶 15 min 时合金的晶粒比较细小,随着固溶时间的延长,晶粒尺寸有所增加,当固溶 60 min 后

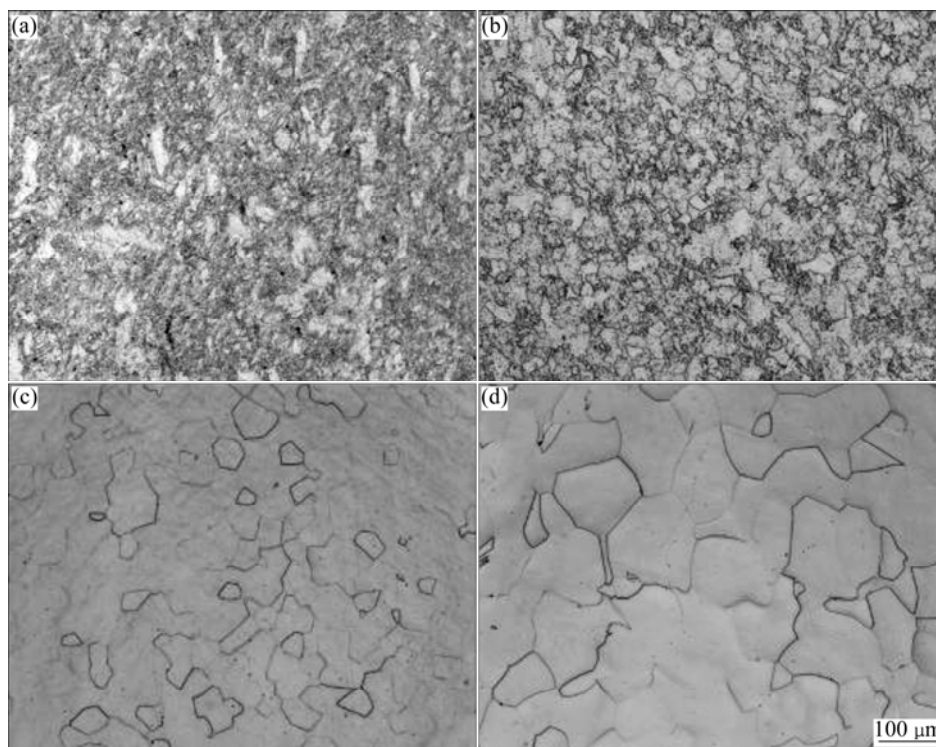


图 1 不同温度下固溶处理 30 min 后 Ti-6554 合金的淬火金相组织

Fig.1 Microstructures of Ti-6554 alloy after solution treatment at different temperatures and quenching in water: (a) 770 °C; (b) 780 °C; (c) 790 °C; (d) 800 °C

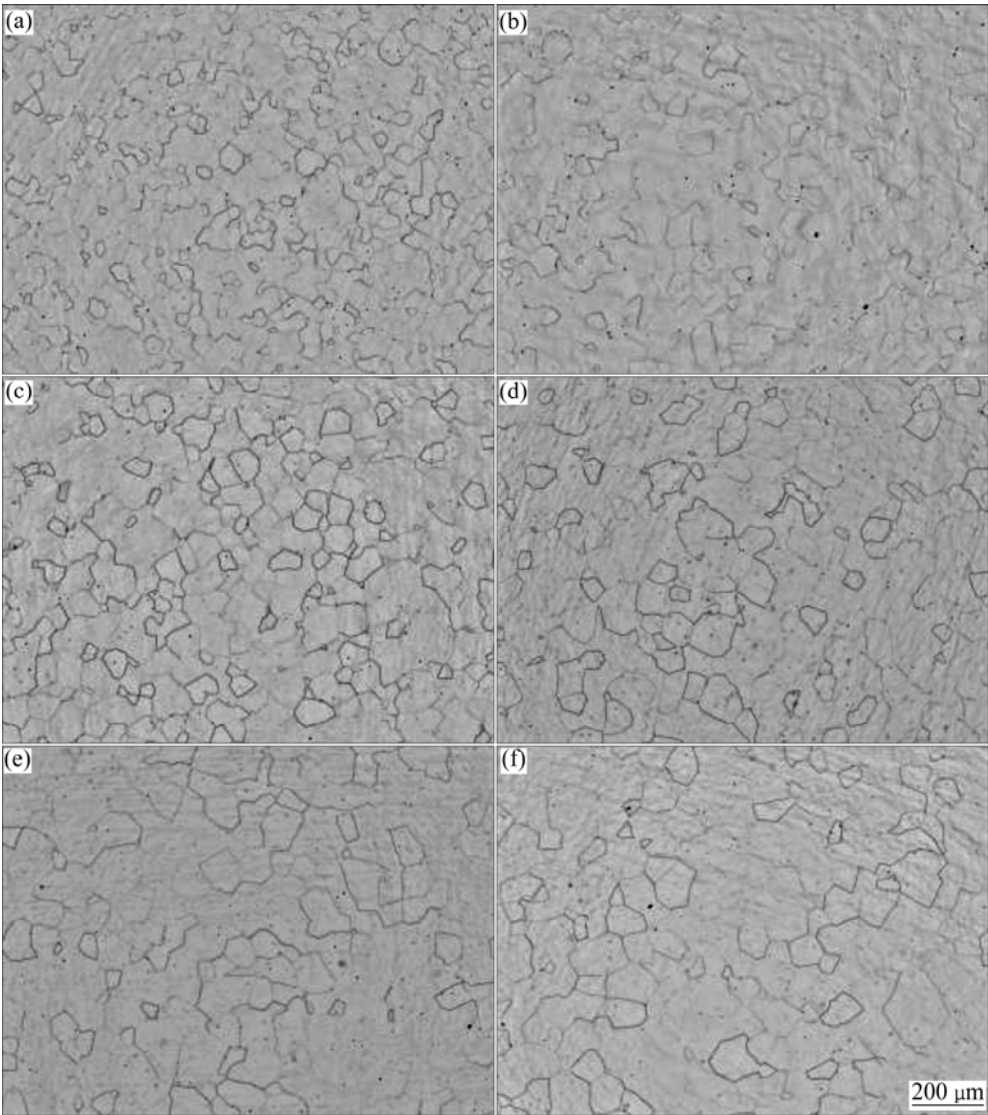


图 2 800 °C下固溶处理不同时间后 Ti-6554 合金的金相组织

Fig.2 Microstructures of Ti-6554 alloy solution treated at 800 °C for different solution time: (a) 15 min; (b) 30 min; (c) 45 min; (d) 60 min; (e) 90 min; (f) 120 min

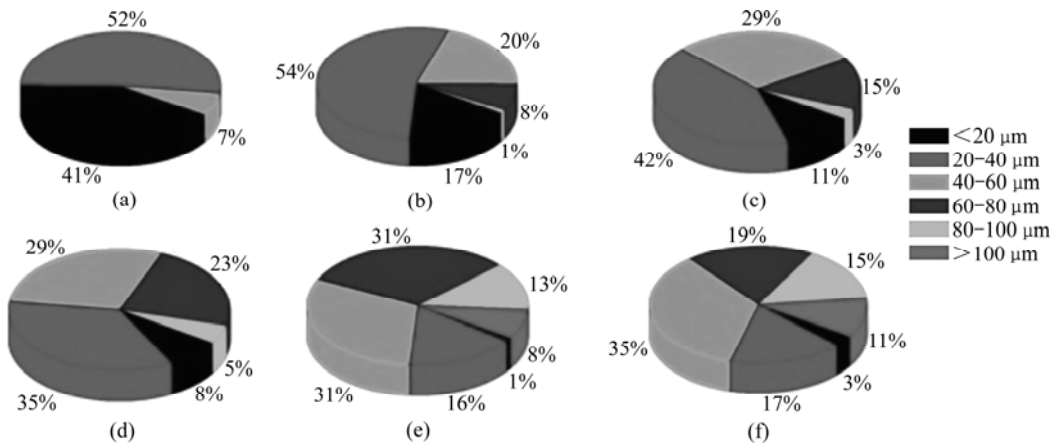


图 3 800 °C下固溶处理不同时间后 Ti-6554 合金的晶粒尺寸分布

Fig.3 Grain size distribution of Ti-6554 alloy solution treated at 800 °C for different solution time: (a) 15 min; (b) 30 min; (c) 45 min; (d) 60 min; (e) 90 min; (f) 120 min

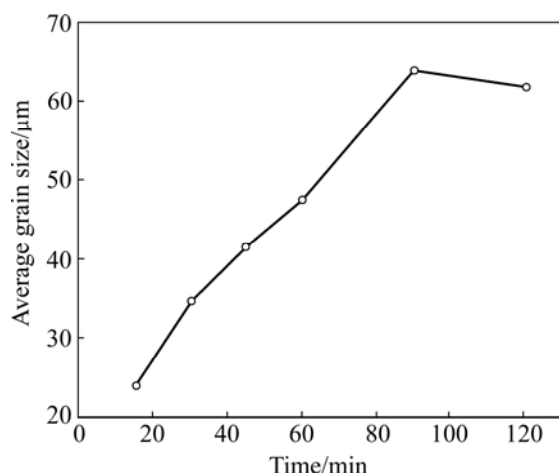


图 4 800 °C下固溶处理不同时间后 Ti-6554 合金的平均晶粒尺寸

Fig.4 Average grain size of Ti-6554 alloy solution treated at 800 °C for different solution time

10 μm 以下的细小晶粒基本消失, 细小的晶粒开始长大。从图 3 可以看出, 随着固溶时间的延长, 合金的晶粒逐渐长大, 固溶处理 15~60 min 后, 50%以上的晶粒尺寸仍然在 50 μm 以下, 固溶处理 90 min 后晶粒开始明显长大, 50%以上的晶粒尺寸在 50~100 μm, 甚至个别晶粒达到 150 μm。从图 4 可以看出: 合金的晶粒平均尺寸随着固溶时间的延长而增大, 固溶处理 15 min 时平均晶粒最小, 为 23.99 μm, 固溶处理 60 min 和 120 min 后平均晶粒尺寸均大于 60 μm, 固溶处理 60 min 后合金的平均晶粒长大较快。

2.2.2 晶粒长大方程

在单相合金中, 等温条件下晶粒平均直径服从以下经验公式^[2]:

$$\bar{D} = kt^n \quad (1)$$

式中: $\bar{D}$ 为晶粒的平均直径; t 为退火时间; k 和 n 分别为与材料和温度有关的常数。如果用对数坐标表示 $\bar{D}$ 与 t 的关系, 将得到一条直线, $\lg k$ 为其截距, n 为其斜率。

Ti-6554 合金经 800 °C 固溶处理不同时间时热处理时间和平均晶粒尺寸之间的关系及拟合结果见图 5。

从图 5 可知, 800 °C 时晶粒随着加热时间的延长而长大方程为

$$\bar{D} = 6.16t^{0.5} \quad (2)$$

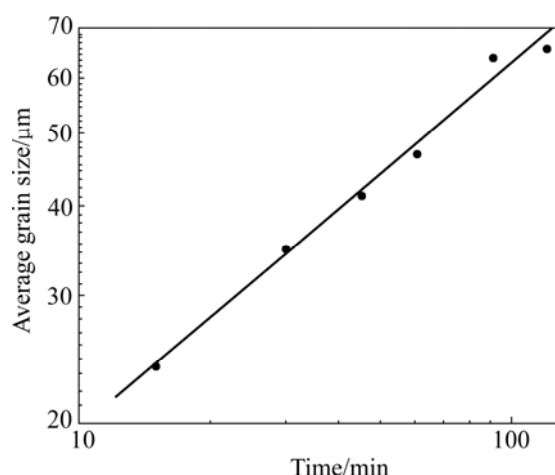


图 5 晶粒平均直径与固溶时间的关系拟合曲线

Fig.5 Fitting curve between average grain size and solution time

可以通过公式(2)对 800 °C 下不同固溶时间的晶粒平均直径进行预测, 也可以根据晶粒平均直径来选择加热时间。

2.3 固溶温度对合金晶粒度的影响规律

在相变点以上分别选取固溶温度 800、830、860、890、920 和 950 °C 进行 30 min 固溶处理, 固溶冷却方式均为空冷。对固溶处理后的试样进行金相组织观察, 金相组织见图 6。对合金的晶粒尺寸进行测量, 随机选取 100 个晶粒测量其直径, 结果见图 7。

从图 6 可以看出: 合金经过相变点以上不同温度固溶处理 30 min 后, 获得单一的 β 相。在同一固溶温度下, 合金的晶粒尺寸分布不均匀, 从几十微米到几百微米。 β 晶粒尺寸随着固溶温度的不同有所变化, 在 800~860 °C 进行固溶处理时, 随着固溶温度的升高, 晶粒有长大的趋势, 但并不明显, 晶粒分布在 20~100 μm; 超过 860 °C 固溶处理时, 晶粒明显开始长大; 920 °C 固溶时晶粒明显粗化。从图 7 可以看出, 随着固溶温度的升高, 合金的晶粒逐渐长大, 在 800~860 °C 固溶处理时, 50%以上的晶粒尺寸仍然在 50 μm 以下, 890 °C 固溶处理时晶粒开始明显长大, 固溶温度升到 920 °C 时 60%以上的晶粒尺寸大于 100 μm, 固溶温度达 950 °C 时甚至约有 25% 的晶粒达到 200 μm 以上。从图 8 可以看出, 合金的平均晶粒尺寸随着固溶温度的升高而增大, 固溶温度为 800 °C, 处理 30 min 时, 平均晶粒最小, 为 30.23 μm; 固溶温度为 950 °C 时, 平均晶粒尺寸为 160 μm; 固溶温度达到 890 °C 时, 晶

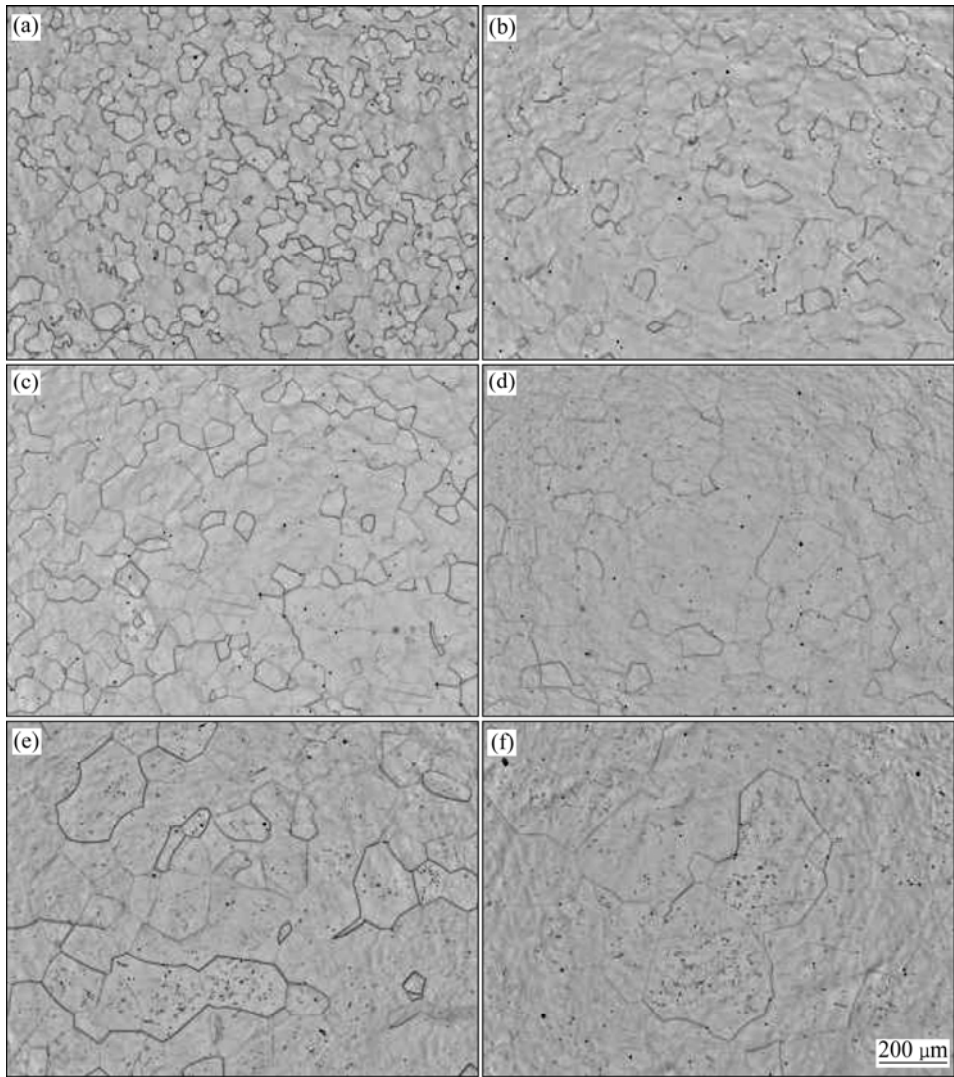


图 6 在不同温度固溶处理 30 min 后 Ti-6554 的合金金相组织

Fig.6 Microstructures of Ti-6554 alloy solution treated at different temperatures for 30 min: (a) 800 °C; (b) 830 °C; (c) 860 °C; (d) 890 °C; (e) 920 °C; (f) 950 °C

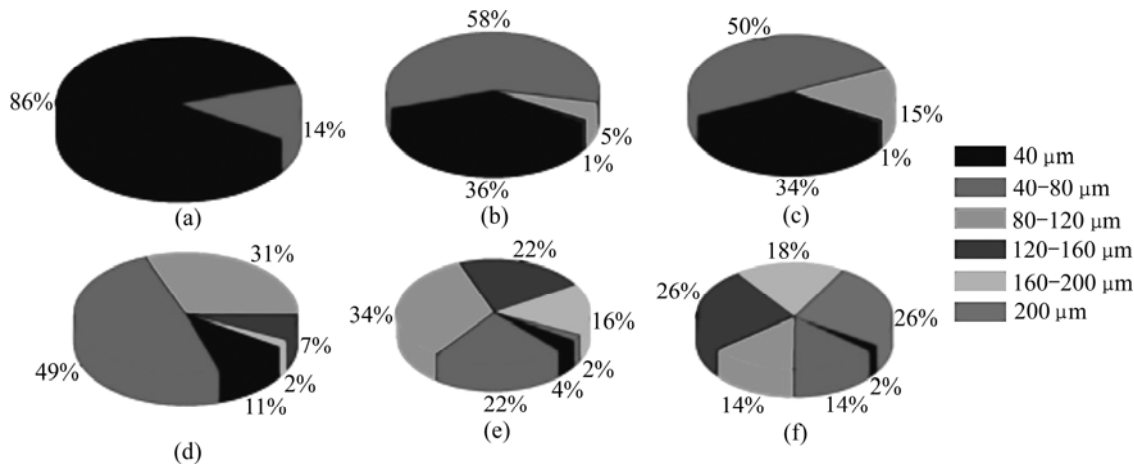


图 7 在不同温度固溶处理 30 min 后 Ti-6554 合金的晶粒尺寸分布

Fig.7 Grain size distribution of Ti-6554 alloy treated at different solution temperatures for 30 min: (a) 800 °C; (b) 830 °C; (c) 860 °C; (d) 890 °C; (e) 920 °C; (f) 950 °C

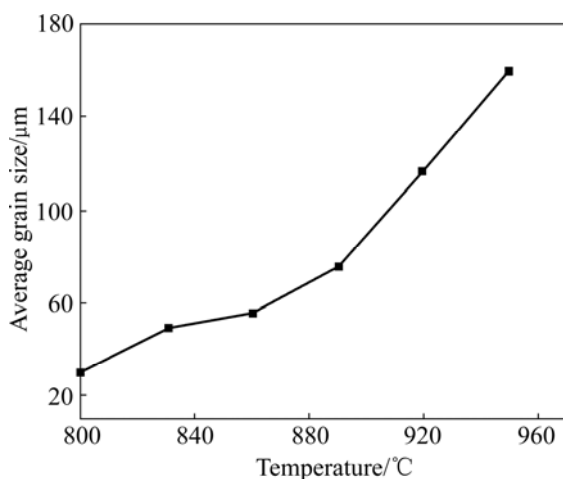


图 8 不同温度固溶处理 30 min 后 Ti-6554 合金平均晶粒的尺寸

Fig.8 Average grain size of Ti-6554 alloy treated at different solution temperatures for 30 min

粒长大明显。

综上所述, 为避免固溶过程中晶粒长大和组织粗化对合金性能的影响, 根据横截面大小, Ti-6554 合金的固溶处理制度可以在 800~860 °C, 15~60 min 选择。

2.4 影响 Ti-6554 合金晶粒长大的因素分析

固溶温度和固溶时间对合金的相组成、分布、尺寸以及后续的时效响应有很大的影响。在研究的固溶时间和固溶温度选择范围内, 随着固溶时间的延长, 晶粒长大的趋势明显低于固溶温度的升高带来的晶粒长大, 因此, 在本研究的温度和时间范围内, 固溶温度对晶粒度的影响更为显著。

3 结论

1) 采用淬火金相法测得 Ti-6554 钛合金的相变点为 780~790 °C。

2) 在 800 °C 固溶时, 随着固溶时间的延长, 晶粒的尺寸增大, 固溶时间超过 60 min 后, 晶粒长大速度加快。800 °C 时晶粒平均直径随着时间的长大方程为 $\bar{D} = 6.16t^{0.5}$ 。

3) 固溶时间为 30 min 时, 在 800~950 °C 范围内, 随着固溶温度的升高, 合金的晶粒直径增大, 920 °C 固溶后, 晶粒明显粗化。

4) Ti-6554 合金的固溶处理制度可以在 800~860 °C, 固溶 15~60 min 的范围内选择。

5) 在本研究的温度和时间范围内, 固溶温度对晶粒度的影响更为显著。

REFERENCES

- [1] 王韦琪, 羊玉兰, 张永强, 李峰丽, 杨慧丽, 张平辉, 新型高强高韧钛合金 BTi-6554[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊 3): 43-45.
WANG Wei-qi, YANG Yu-lan, ZHANG Yong-qiang, LI Feng-li, YANG Hui-li, ZHANG Ping-hui. New type high-strength and high-toughness titanium alloy BTi-6554 [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(Suppl 3): 43-45.
- [2] 谢希文, 路若英. 金属学原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 1987: 292.
XIE Xi-wen, LU Ruo-ying. Metallography principle [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1987: 292.

(编辑 杨 兵)