

热处理对 TG6 合金热模锻件组织不均匀性的影响

王 涛, 郭鸿镇, 王彦伟, 姚泽坤

(西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘 要: 采用坯料加热温度超过 β 相变点而模具温度低于 β 相变点的热模锻造方式, 利用光学显微镜和图像分析软件研究双重和三重热处理制度对 TG6 合金锻件显微组织的影响。结果表明: TG6 合金热模锻件显微组织的不均匀性是由于变形时发生的 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变和微区变形的不均匀造成的。热处理制度不能彻底消除 TG6 合金锻件的显微组织不均匀性, 但随高温保温时间的延长, 不均匀程度降低。双重热处理时, 第一重热处理后的冷却速率越慢, 次生 α 相厚度越大。三重热处理时, 第二重较高温度处理可显著地减小次生 α 相的尺寸。

关键词: TG6 钛合金; 热模锻造; 组织不均匀性; 热处理

中图分类号: TG 316; TG 113.2

文献标志码: A

Effects of heat treatment on microstructural inhomogeneity of TG6 alloy hot die forgings

WANG Tao, GUO Hong-zhen, WANG Yan-wei, YAO Ze-kun

(School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: TG6 alloy was forged by the hot die forging process in which the temperature of the billets was above the β transformation temperature and that of the die was below the β transformation temperature. The effects of double and triplex heat treatments on the microstructures of TG6 alloy forgings were studied by optical microscopy and image analysis software. The results show that the microstructure inhomogeneity is caused by the $\beta \rightarrow \alpha$ transformation and the inhomogeneity of microdeforming. The microstructural inhomogeneity does not disappear absolutely after heat treatments, but with the increase of heating time, the inhomogeneity decreases. The thickness of secondary α phase becomes large with decrease of cooling rate after the first heat treatment during the double heat treatment. The second high temperature heat treatment decreases the size of secondary α phase during the triplex heat treatments.

Key words: TG6 titanium alloy; hot die forging; microstructural inhomogeneity; heat treatment

TG6 合金是一种 600 用近 α 型钛合金, 该合金是在 IMI834 合金基础上提高 Si 元素含量, 增添 Ta 元素设计而成的, Si 元素含量的增加可以进一步提高合金的蠕变抗力。该合金可以作为飞机发动机压气机盘、叶片和风扇的候选材料, 目前正处于工业生产的试制阶段。在钛合金的众多热加工方式中, 常规锻造即两相区锻造是最为常见的, 但是随着大型的、形状复杂的钛锻件需求量的增大, 该方式已暴露出明显的不足, 如变形抗力大、模锻时材料的流动性差等。如将钛合

金的锻前加热温度提高到 β 单相区, 不仅可以改善模锻件的成型性能, 还可以减轻锻造设备的负荷, 有利于形状复杂的钛合金大锻件的生产。但钛合金的组织遗传性常常导致锻件显微组织的不均匀, 成为制约该加工方式工业化生产的重要原因之一^[1-4]。本文作者采用坯料加热温度超过 β 相变点而模具温度低于 β 相变点的热模锻造方式, 对锻件施以不同的热处理制度, 研究热处理制度对显微组织的影响, 找出组织均匀化的有利因素, 希望为该合金热模锻件热处理工艺提供

理论和实验依据。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为某工厂提供的 TG6 合金热轧棒材,采用金相法测定的 β 转变温度为 1 045 。原始棒材显微组织如图 1 所示,由等轴初生 α 相(α_p)和 β 转变组织(β_t)组成。初生 α 相尺寸较均匀, β 转变组织中次生 α 相呈团束状分布。

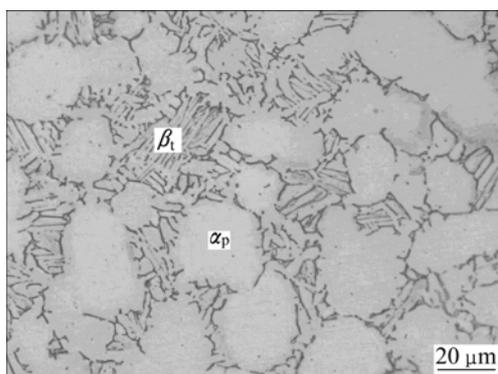


图 1 TG6 合金棒材显微组织

Fig.1 Microstructure of Ti60 alloy hot-rolled bar

1.2 实验方法

热模锻造所用设备为 6 300 kN 四柱液压机,应变速率、变形程度等工艺参数由液压机电控系统准确控制。锻造工艺参数如下:坯料温度为 1 075 ,模具温度为 950 ,应变速率为 $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,变形量为 50%。坯料尺寸为 61 mm×21 mm×24 mm,锻前加热保温时间为 15 min^[5],锻后空冷,所得显微组织如图 2 所示。显微组织具有明显的变形形貌,原始 β 晶粒被压扁或破碎,可以观察到部分晶界 α 相的存在,晶粒内部片

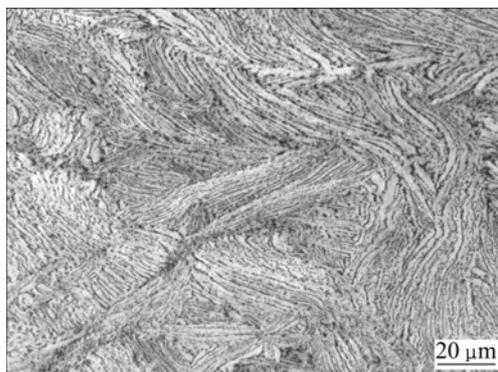


图 2 热模锻后空冷的 TG6 合金显微组织

Fig.2 Microstructure of TG6 alloy after hot-die forging

状 α 相厚度不均匀且呈平行扭曲状分布。

热处理所用设备为 SX2-10-50 高温电阻炉,热处理制度如表 1 所示,其中工艺 1 与 2 为双重热处理,而工艺 3~6 为三重热处理。在 OLYMPUS PM-G3 卧式显微镜上观察金相组织,并利用 SISCIA5 V8.0 金相图像分析软件测量显微组织的特征参数。

表 1 TG6 合金热模锻件的热处理制度

Table 1 Heat treatment of TG6 alloy forgings

Processing No.	Heat treatment
1	(1 015 , 2 h, AC)+(700 , 2 h, AC)
2	(1 015 , 2 h, WC)+(700 , 2 h, AC)
3	(1 015 , 2 h, AC)+(915 , 2 h, AC)+(700 , 2 h, AC)
4	(1 015 , 2 h, FC)+(915 , 2 h, AC)+(700 , 2 h, AC)
5	(1 015 , 2 h, FC)+(915 , 2 h, WC)+(700 , 2 h, AC)
6	(1 015 , 2 h, FC)+(915 , 2 h, FC)+(700 , 2 h, AC)

AC—Air cooling, WC—Water cooling, FC—Furnace cooling.

2 结果与讨论

2.1 双重热处理对合金显微组织的影响

图 3 所示为 TG6 合金热模锻件经双重热处理后的显微组织,显微组织中均存在部分等轴 α 相(α_c)和呈一定方向平行分布的板条 α 相(α_b),且同一板条 α 相的厚度不均匀。第一重热处理后的冷却速率对锻件中次生 α 相(α_t)具有显著影响,空冷时显微组织中次生 α 相呈现片状(图 3(a)),而当水冷时在光学显微镜下观察不到次生 α 相(图 3(b))。

2.2 三重热处理对合金显微组织的影响

图 4 所示为三重热处理后 TG6 合金锻件的显微组织。可以看出:合金锻件仍不同程度地存在组织不均匀性。第一重热处理后的冷却速率对显微组织具有显著影响,炉冷(图 4(b)~(d))较空冷(图 4(a))合金组织中的初生 α 相尺寸明显增大,板条状 α 相长宽比减少,且炉冷的组织中观察不到片状次生 α 相。

2.3 显微组织分析

热模锻件经 6 种热处理后,显微组织均不同程度地存在不均匀性,由此可见,显微组织不均匀性是由

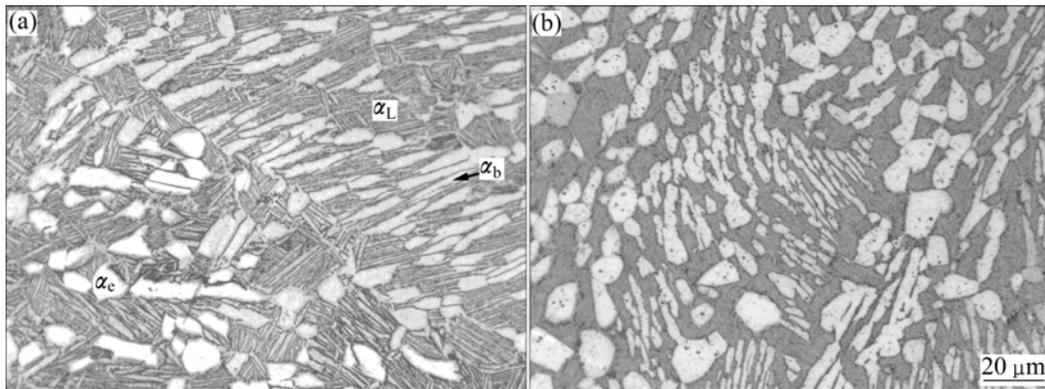


图 3 TG6 合金热模锻件双重热处理后的显微组织

Fig.3 Microstructures of TG6 alloy forgings after double heat treatment: (a) (1 015 , 2 h, AC)+(700 , 2 h, AC); (b) (1 015 , 2 h, WC)+(700 , 2 h, AC)

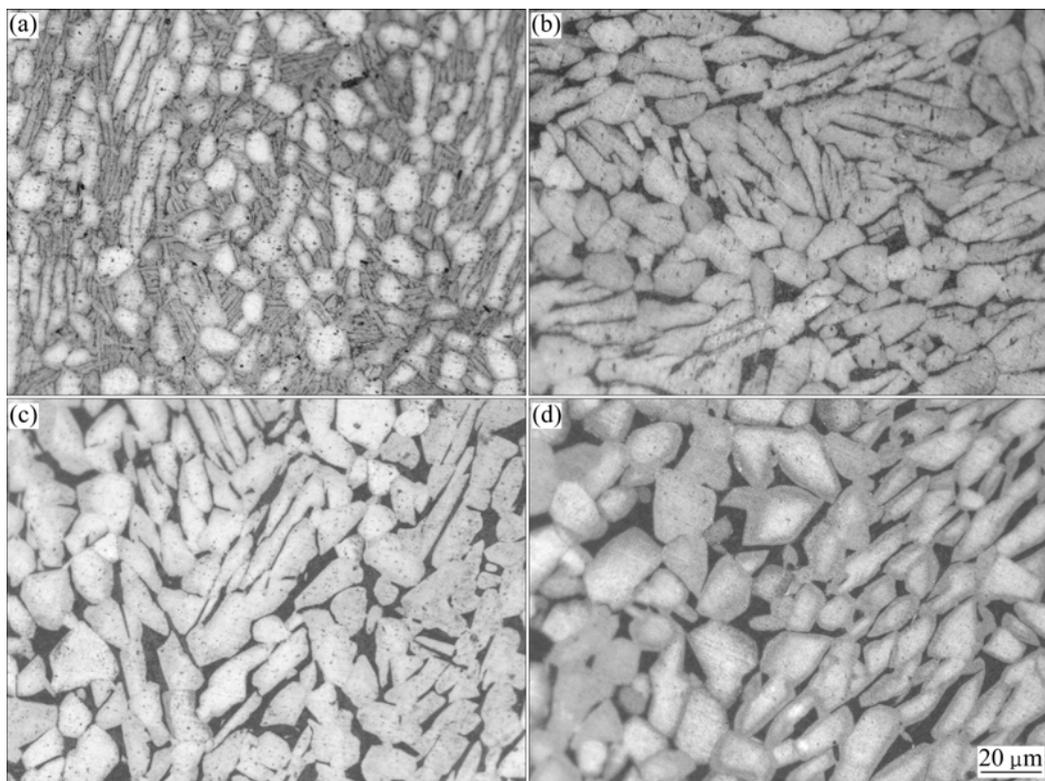


图 4 三重热处理后 TG6 合金热模锻件的显微组织

Fig.4 Microstructures of TG6 alloy forgings after triplex heat treatment: (a) (1 015 , 2 h, AC)+(915 , 2 h, AC)+(700 , 2 h, AC); (b) (1 015 , 2 h, FC)+(915 , 2 h, AC)+(700 , 2 h, AC); (c) (1 015 , 2 h, FC)+(915 , 2 h, WC)+(700 , 2 h, AC); (d) (1 015 , 2 h, FC)+(915 , 2 h, FC)+(700 , 2 h, AC)

锻造过程所决定的。本实验中坯料加热温度为 1 075 , 而模具温度为 950 , 温差达 125 , 坯料跨 β 相变点变形。当坯料在 β 单相区变形时, β 晶粒被压扁甚至部分破碎, 而当坯料温度低于 β 相变点时, α 相会以片状形态析出^[6], 这样, 合金的变形就会转变为 $\alpha+\beta$ 两相变形。变形结束时已析出的 α 相(包括晶内和晶界)

经历了变形和长大两个过程, 而剩余高温 β 相变形后会发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 或 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变, 因此, 合金锻造空冷后的显微组织中片状 α 相厚度不均匀且具有变形形貌。

各热处理工艺下的合金锻件显微组织均不同程度地存在不均匀性, 且均包含等轴 α 相和板条状 α 相(图 3 和图 4), 这是由钛合金组织的遗传性所决定的。变形

过程中所析出的 α 相一部分变形量较大,存在较大的畸变能,在随后的热处理过程中发生了球化;而另一部分变形量较小的 α 相则长大成为板条状 α 相。由此可以看出: TG6 合金热模锻件显微组织的不均匀性是由于变形时发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变和微区变形的不均匀所造成的[7-8]。

锻件经双重热处理后的显微组织不均匀程度相近,区别主要为次生 α 相(图3)。第一重热处理空冷时,冷却速率较慢,由于该合金 β 稳定元素较少,高温下的 β 相发生稳定转变,即 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变,同时较慢的冷却速率促进了次生 α 相的长大,因此次生 α 相呈现片状(图3(a));而当冷却速率较快时(水冷),高温下的 β 相来不及发生稳定转变,而发生 $\beta \rightarrow \alpha'$ 马氏体转变,由于过冷度非常大,增加了马氏体的形核密度,造成次生 α 相非常细小(图3(b))。

当采用三重热处理时,各工艺下显微组织的主要区别为初生 α 相与片状 α 相的尺寸。第一重热处理后空冷的显微组织(图4(a))中,初生 α 相的尺寸明显较炉冷的减小,且可以观察到片状 α 相。当第一重热处理后空冷时,合金中发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变,生成片状 α 相。而当炉冷时,合金中同样会发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变,但此时冷却速率极慢,发生转变时的过冷度很小,不利于 α 相的形核,同时较高的温度加快了合金元素向初生 α 相中的扩散,这一点可由初生 α 相尺寸的增大进一步证明,因此次生 α 相得不到长大的机会,所以观察不到次生 α 相^[9]。合金经第一重热处理后再结晶和回复进行得较充分,即在随后的热处理中不存在晶粒形核问题,而只存在晶粒长大问题,因此,高温下停留时间越长,合金晶粒尺寸越大(图4(b)、(c)、(d))。

图5给出了TG6合金锻件在6种热处理制度下显微组织中板条状 α 束面积百分比,该百分比可近似表示显微组织的不均匀程度。可以看出:两重热处理后不均匀程度相近,板条状 α 束占35%左右(图5中1与2工艺),当采用三重热处理时,组织不均匀程度较双重热处理时显著降低,且随高温下保温时间的延长而呈下降趋势。

3 结论

1) TG6合金热模锻件显微组织的不均匀性是由于变形时发生的 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变和微区变形不均匀造成的。

2) 热处理制度不能彻底消除跨相变点锻造的TG6合金显微组织的不均匀性,但随高温保温时间的

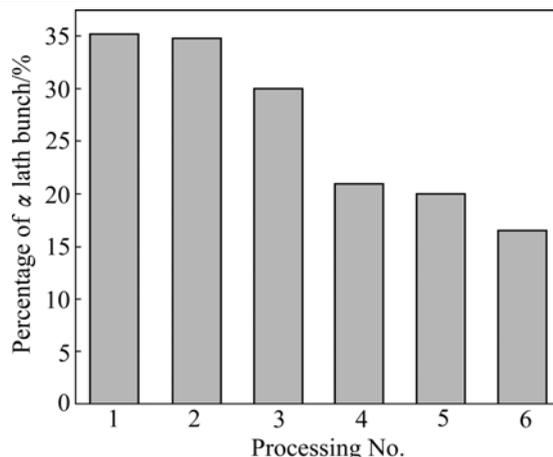


图5 TG6合金锻件中板条状 α 束所占百分比

Fig.5 Percentage of α lath bunch in microstructure of TG6 alloy forgings

延长,显微组织的不均匀程度降低。

3) 双重热处理时,第一重热处理后的冷却速率越慢,次生 α 相厚度越大;三重热处理时,第二重较高温处理可显著减小次生 α 相的尺寸。

REFERENCES

- [1] GIL F J, GINEBRA M P, MANERO J M, PLANELL J A. Formation of α -widmanstatten structure: Effects of grain size and cooling rate on the widmanstatten morphologies on the mechanical properties in Ti6Al4V alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2001, 329(14): 142-152.
- [2] 曾卫东, 周义刚. 冷速对 TC11 合金 β 加工显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(12): 1273-1276.
ZENG Wei-dong, ZHOU Yi-gang. Influence of cooling rate on microstructure and mechanical properties of beta processed TC11 alloy [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2002, 38(12): 1273-1276.
- [3] 李晓芹. 钛合金 β 锻造组织不均匀性研究[J]. 金属热处理, 2000(3): 17-20.
LI Xiao-qin. Research on uneven microstructure in Ti-alloy by β forging [J]. Heat Treatment of Metals, 2000(3): 17-20.
- [4] 雷锦文, 曾卫东, 朱知寿, 俞汉清, 周义刚. TC21 钛合金 β 锻造大块 α 相研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(5): 14-18.
LEI Jin-wen, ZENG Wei-dong, ZHU Zhi-shou, YU Han-qing, ZHOU Yi-gang. Research on blocky alpha in beta processed TC21 titanium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat treatment, 2009, 30(5): 14-18
- [5] 郭鸿镇. 合金钢与有色金属锻造[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
GUO Hong-zhen. Forging of alloy steel and nonferrous metal

- [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1999.
- [6] 蔡学章, EYLON D. Ti-1100 合金 β 热处理组织特性[J]. 稀有金属材料与工程, 1994, 23(3): 27-32.
CAI Xue-zhang, EYLON D. Microstructural features of the β heat-treated Ti-1100 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1994, 23(3): 27-32.
- [7] 姚泽坤, 郭鸿镇, 苏祖武, 孙开本, 徐永超, 曹晓卿. 热力参数对 $(\alpha+\beta)$ 两相钛合金再结晶百分数和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(5): 340-343.
YAO Ze-kun, GUO Hong-zhen, SU Zu-wu, SUN Kai-ben, XU Yong-chao, CAO Xiao-qing. Effect of microstructure and recrystallization and mechanical properties of two-phase $(\alpha+\beta)$ Ti alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2000, 29(5): 340-343.
- [8] 陈慧琴, 林好转, 郭灵, 曹春晓. 钛合金热变形机制及微观组织演变规律的研究进展[J]. 材料工程, 2007(1): 60-64.
CHEN Hui-qin, LIN Hao-zhuang, GUO Ling, CAO Chun-xiao. Progress on hot deformation mechanisms and microstructure evolution of titanium alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2007(1): 60-64.
- [9] 杨义, 徐锋, 黄爱军, 李阁平. 全片层BT18Y钛合金在 $\alpha+\beta$ 相区固溶时的显微组织演化[J]. 金属学报, 2005, 41(7): 713-720.
YANG Yi, XU Feng, HUANG Ai-jun, LI Ge-ping. Evolution of microstructure of full lamellar titanium alloy BT18Y soluteionzed at $\alpha+\beta$ phase field [J]. Acta Metallurgica, 2005, 41(7): 713-720.

(编辑 杨兵)