

凝固路径对铸态 ZTC4 钛合金组织的影响

张守银^{1,2}, 李金山¹, 寇宏超¹, 杨 光¹

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 330063)

摘 要: 研究了 ZTC4 钛合金凝固过程中在 β 相区、 $\alpha+\beta$ 相转变区的保温控制以及在 700~950 °C 循环热处理对凝固组织的影响。结果表明: 在 β 相区进行保温时, β 晶粒粗大且形状不规则; 在 $\alpha+\beta$ 相转变区进行保温控制时, α 片层发生粗化、碎断, 组织得到细化; 而在 700~950 °C 进行循环热处理时, α 片层出现扭曲, 组织细化得更加明显。

关键词: 钛合金; 铸造; 凝固路径; 保温处理; 循环热处理

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of solidification route on microstructure in cast ZTC4 Ti alloy

ZHANG Shou-yin^{1,2}, LI Jin-shan¹, KOU Hong-chao¹, YANG Guang¹

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The effects of heat preservation in β phase field, $\alpha+\beta$ phases field and cyclic heat treatment at 700–950 °C in the solidification of ZTC4 Ti alloy were investigated. The results show that β grain size inclines to be coarse and irregular in heat preservation in β phase field. In the case of heat preservation in $\alpha+\beta$ phase field, the α lamella tends to be coarse, shatter to pieces, hence, the microstructure is refined. The α lamellas twist and the refinement is more obvious in the cyclic heat treatment at 700–950 °C.

Key words: titanium alloy; casting; solidification path; heat preservation; cyclical heat preservation

钛合金由于具有高强度、优异的耐热性能以及出色的抗腐蚀性能, 在航空等领域发挥着重要的作用^[1]。然而, 受高成本的影响, 钛合金的使用受到很大限制。钛合金精密铸造是一种近净成型的方法, 相对于锻造等其他冶金方法, 具有很大的成本优势^[2]。同时, 热等静压和热处理的应用, 消除了钛合金铸造缩孔、气孔等缺陷, 组织得到了进一步的优化, 使钛合金铸件的性能可以达到或接近锻件。

在钛合金铸造过程中, 凝固路径对组织起着决定作用, 进而影响铸件的性能。在钛合金铸造过程的组织控制方面, 一些研究者开展了工作。如 OI 等^[3]研究了 ZTC4 钛合金在相变温度附近冷却速度对组织和性

能的影响, 认为微观组织主要受 1 273~1 073 K 温度范围内的冷却速度影响, 而与刚浇注后的冷速关系不大。此温度范围为 ZTC4 钛合金 $\alpha-\beta$ 相转变区间。ZTC4 常见的热处理工艺也选择在相变温度附近^[4-5]。如果在凝固过程中在相变温度附近直接进行保温处理, 必然影响 ZTC4 合金的组织, 而钛合金 β 初始晶粒大小, 初生相 β 、次生相 α 的体积分数, α 集束尺寸, 片层尺寸以及晶界 α 形貌和尺寸等特征决定合金的性能^[6-7]。本文作者在 ZTC4 钛合金凝固过程中, 采取在 β 相区、 $\alpha+\beta$ 相转变区进行保温处理, 以及在 700~950 °C 进行循环保温处理, 随后进行冷却, 研究各工艺条件对组织的影响规律。

1 实验

实验用 ZTC4 钛合金的名义成分为 Ti-6Al-4V。实验将线切割为 $d18\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的圆柱试样置于 $d20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 、壁厚为 2 mm 的 ZrO_2 坩埚进行加热。实验设备为自行研制的感应线圈真空熔炼炉, 极限真空为 $5 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ 。抽真空至 $7 \times 10^{-4}\text{ Pa}$, 充 Ar 至 5.68 kPa, 通过感应线圈加热至 $1750\text{ }^\circ\text{C}$ 。采用双色测温仪测温, 实测 ZTC4 熔点为 $(1660 \pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$, ZTC4 钛合金的 β 相转变温度为 $(995 \pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ 。在不同温度阶段, 即高于 β 相转变温度以上和低于 β 相转变温度区域进行保温和冷却, 或者在 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 5 min, 冷却至 $700\text{ }^\circ\text{C}$, 随后升温, 进行循环保温处理。整个实验过程如图 1 所示。其中合金熔化后升温至 $1760\text{ }^\circ\text{C}$, 保温时间为 30 s。熔炼后的试样从离底部 10 mm 处横向剖切, 然后进行研磨抛光, 采用的腐蚀液为 $5\%\text{HF}+10\%\text{HNO}_3+85\%\text{H}_2\text{O}$, 腐蚀时间为 10 s。采用光镜和扫描电镜对组织形貌进行观察分析, 采用 IPP 软件对相体积分数进行计算。

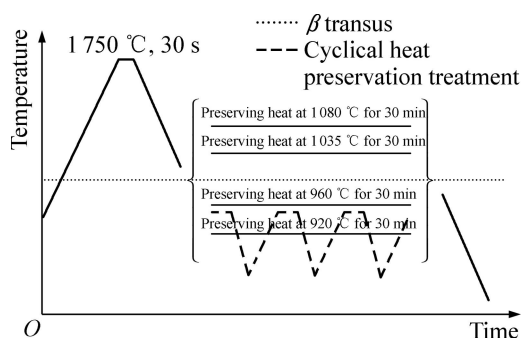


图1 铸态 ZTC4 钛合金的实验工艺示意图

Fig. 1 Schematic of diagram solidification route of cast ZTC4 Ti alloy

2 结果与讨论

2.1 直接冷却微观组织

将试样置于坩埚内, 感应线圈加热, 升温至 $1750\text{ }^\circ\text{C}$, 保温 30 s 后, 直接关掉电源冷却。当冷却至 β 转变温度以下时, 沿平行于 β 相特定平面的 α 相密排面, β 相转变为 α 相。在缓慢冷却过程中, α 相沿该密排面生长速度较快, 而垂着于密排面生长缓慢, α 片层形成^[5]。所得到的组织为魏氏体组织, 由 α 片层以及 α 片层之间残留的 β 相构成。组织中存在粗大、连续的晶界 α , 平行的 α 片层构成 α 集束, 如图 2 所示。

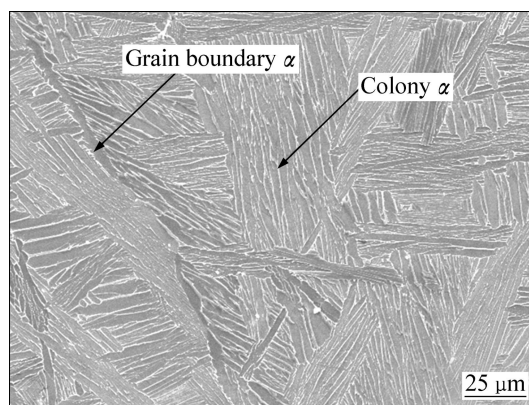


图2 直接冷却 ZTC4 钛合金的 SEM 像

Fig. 2 SEM image of ZTC4 Ti alloy cooled directly after melting

2.2 保温处理微观组织

在 ZTC4 钛合金的凝固过程中, 在 β 相转变温度附近进行保温 30 min, 保温温度的不同导致组织差异很大。图 3 分别为在 β 相区 $1080\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1035\text{ }^\circ\text{C}$ 以及 $\alpha+\beta$ 相区 $960\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $920\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 30 min 随后冷却得到的组织。从图 3(a)可见, 在高于 β 相转变温度的过高温保温, 即 $1080\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 30 min, 由于拉伸性能, 尤其是韧性的降低, 会导致微裂纹的产生, 如箭头所示位置。此裂纹随机分布, 与晶界及 α 集束边界位置无关。图中白色为剩余 β 相, 其余为 α 相。在裂纹周围出现 β 相, 说明该裂纹在 β 相转变温度以上产生, 随着温度降低至 $\alpha+\beta$ 相区, 发生相变, 残留 β 相出现在裂纹周围。

在 $1035\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 30 min, 随后进行冷却, 由于在较高的温度保温, 原子扩散和界面能增加, α 片层不再平行规则排列, 部分 α 片层发生了扭曲、碎断, 即出现了球化或等轴化。大量等轴 α 的出现影响了钛合金的性能^[5]。等轴 α 可以减小 α 集束的各向异性以及减小 α 集束尺寸大小不同引起的差异, 而这些特征普遍存在于铸件组织中。

同时, 残留的大块 β 相中出现细小的次生 α 相, 宽度约为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$, 如图 3(b)所示。在 $960\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 30 min, 也出现了类似结果, 如图 3(c)所示。析出次生 α 可以使 β 相硬化, 对钛合金力学性能会产生有利的影响^[5]。细小的次生 α 片不仅强化了 β 相, 使其强度增强, 而且细化了整体组织, 从而提高了材料的塑性^[8-9]。

在 $920\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 30 min, 随后进行冷却, 由 β 相转变而来的平行 α 片层发生了扭曲, α 相极不规则。经 IPP 软件计算, α 相体积分数由熔化后直接冷却的 77% 增加到 90%。

2.3 循环保温处理微观组织

在 β 相向 α 相转变过程中, 原子排布由体心立方结构(bcc)向密排六方结构(hcp)转变。钛的相变体积效应不大, 约为 0.17%, 只有铁的 γ/α 相变的 1/50, 因此, 钛的相变应力很小, 不足以使新相大量形核。因此, 铸造钛合金和铸钢不一样, 不能通过相变重结晶

来细化晶粒^[10]。但长时间在 β 转变温度附近进行保温, 使 α 片层及残留 β 相继续发生相变, 有助于相变应力的积累, 导致平直的 α 片层发生扭曲、粗化, 甚至等轴化。根据上述讨论, 如果在凝固结束后, 降温至 α - β 转变结束相区(800 °C 以下), 再升温至 α - β 转变相区(800~1 000 °C), 如此循环, 会造成更大的相变应力积

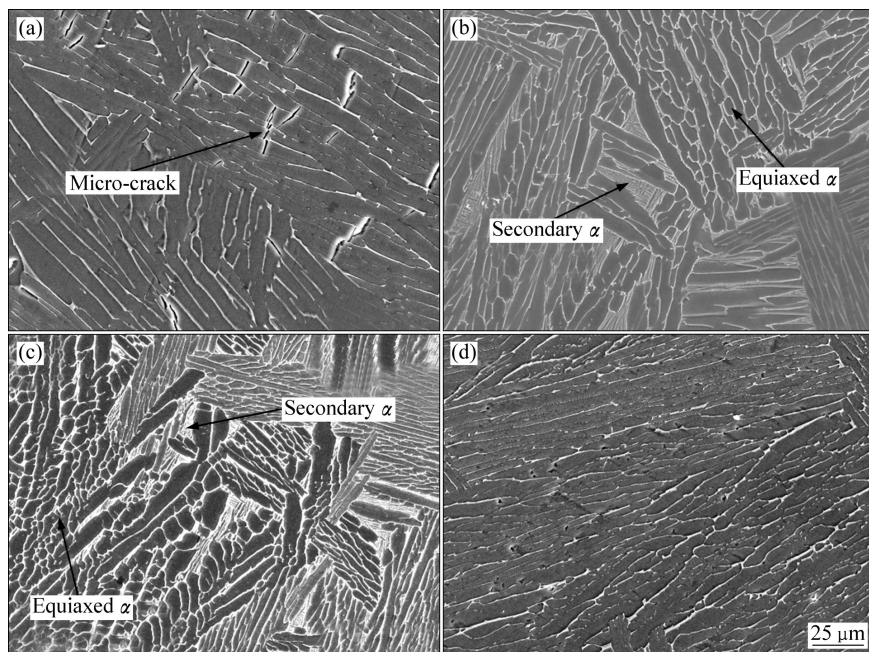


图 3 在相变温度附近保温 30 min 后冷却 ZTC4 钛合金的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of ZTC4 Ti alloy preserve heated at different temperatures for 30 min: (a) 1 080 °C; (b) 1 035 °C; (c) 960 °C; (d) 920 °C

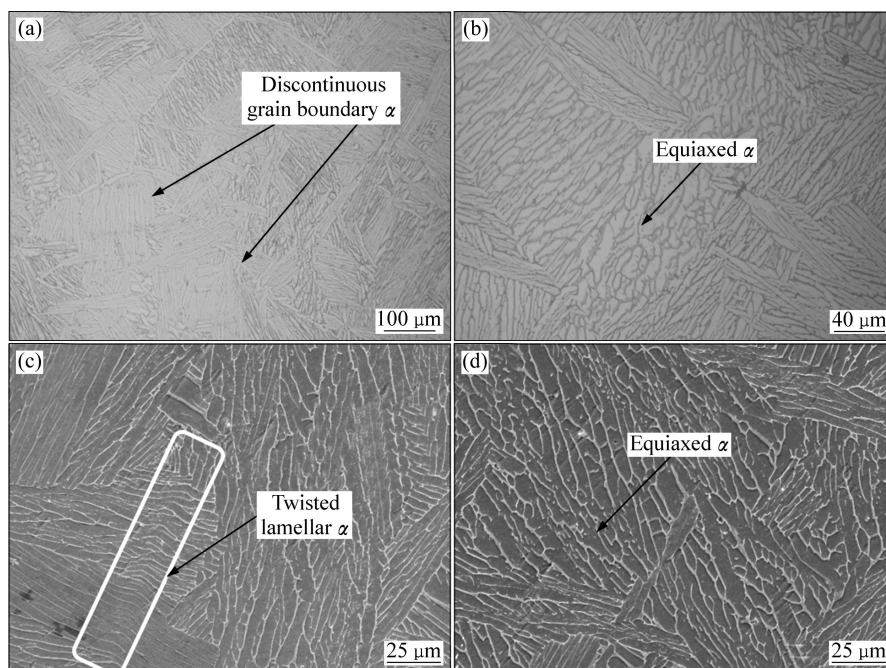


图 4 循环保温处理 ZTC4 钛合金的微观组织

Fig. 4 Microstructures of ZTC4 Ti alloy after cyclical heat preservation treatment: (a), (b) OM image; (c), (d) SEM image

累,进一步提高 α 片层等轴化的比例。如图1虚线所示,在950℃保温5 min,冷却至700℃,随后升温,如此进行3次循环保温处理,然后,关掉电源冷却至室温,所得的微观组织如图4所示。

由图4(a)可见,与直接冷却组织不同,经循环保温处理,晶界 α 不再呈连续分布。由于片状晶界 α 尺寸大,且较软,所以连续的晶界 α 对韧性、疲劳裂纹产生不利^[3,11-12]。据文献[3]报道,当冷却速度大于20 K/s时,可以避免晶界 α 的产生。而对于普通铸造来说,冷却速度要远低于此值。晶界 α 弯曲、不连续对疲劳性能有益。循环保温处理引起的应力积聚,使晶界发生弯曲,甚至断开,将一定程度提高钛合金的韧性和疲劳等性能。同时,由图4(c)方框标示区域可见,平行的 α 片层也发生了弯曲,随着循环保温次数的增加和时间的延长,该区域会进一步发生扭曲,片层 α 最终演变为等轴 α ,如图4(b)和(d)所示。

3 结论

1) ZTC4 钛合金在凝固过程中,在 β 相转变温度附近进行保温,原子扩散和界面能的增加,可以使片层 α 发生扭曲、碎断甚至等轴化。

2) ZTC4 钛合金在凝固过程中,在1080℃或更高的温度保温,合金拉伸性能,尤其是韧性降低,导致微裂纹的出现。

3) 凝固过程中,在 α - β 相转变区以及800℃以下区域进行循环保温处理,可以利用相变应力的积累,增加 α 片层的等轴化,同时,晶界 α 也会呈不连续化。

REFERENCES

- [1] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213: 103-114.
- [2] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213(1): 103-114.
- [3] OI K, TERASHIMA H, SUZUKI K. Control of microstructure in Ti-6Al-4V castparts, metallurgy and technology of practical titanium alloys[M]. FUJISHIRO S, EYLON D, KISHI T. Warrendale, PA: The Minerals Metals & Materials Society, 1994: 219-224.
- [4] 王新英, 谢成木. ZTC4 钛合金固溶时效热处理工艺研究[J]. 金属学报, 2002, 38(z1): 89-92.
WANG Xin-ying, XIE Cheng-mu. Study on solution-aging heat treatment of ZTC4 titanium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(z1): 89-92.
- [5] DONACHIE M J Jr. Titanium: A technical guide[M]. 2nd ed. USA: ASM International, 2002: 22.
- [6] LUETJERING G. J. James Case Williams. Titanium[M]. 2nd ed, 203.
- [7] LUTJERING G, WILLIAMS J J C. Titanium[M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007: 203.
- [8] SCHROEDER G, ALBRECHT J, LUETJERING G. Fatigue crack propagation in titanium alloys with lamellar and bi-lamellar microstructures[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319: 602-606.
- [9] 马英杰, 刘建荣, 雷家峰, 杨锐. 多重热处理对TC4合金的组织 and 力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2008, 22(5): 555-560.
MA Ying-jie, LIU Jian-rong, LEI Jia-feng, YANG Rui. The influence of multi heat-treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(5): 555-560.
- [10] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 1999.
ZHOU Yan-bang. Titanium alloy casting introduction[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1999.
- [11] FROES F H, EYLON D, SURYANARAYANA C. Thermochemical processing of titanium alloys[J]. Journal of Metals, 1990, 42(3): 26-29.
- [12] BARRY E P. Three-dimensional reconstruction of microstructures in α + β titanium alloys[D]. Ohio State University, 2008.

(编辑 杨华)