

不同铸型对 TC4 钛合金的微观组织、织构和持久性的影响

刘文杰¹, 宗学文^{1,2}, 陈 桢², 杨雨蒙³, 杨学东⁴, 卢秉恒²

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054)

(2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

(3. 中航光电科技股份有限公司, 河南 洛阳 471023)

(4. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471026)

摘 要: 研究不同铸型对 TC4 钛合金的微观组织、织构和高温持久性能的影响, 利用光学显微镜(OM)、X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和电子背散射衍射(EBSD)等观察与分析 TC4 钛合金的显微组织与持久性断裂行为。结果表明: 不同铸型工艺 TC4 钛合金的物相均为 α 相、 β 相和 ω 相组成, 其中主要物相为 α 相(约 90%)。与石墨型相比, 陶瓷型有利于 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变, α 相高出 5.3%, 晶粒平均直径大 ($d_{\text{mean}}=37.021 \mu\text{m}$), 晶粒均匀相对稳定, 小晶界角少, 当 α 相比比例增大时材料强度减小, 塑性升高。同时陶瓷型铸造的钛合金试样组织织构强度高、取向明显, 织构类型为 $\{11\bar{2}0\} <1\bar{1}00>$, 与 y 方向呈现约 45° 的夹角, 进一步验证了试样在(100)、(002)、(101)峰强增加的原因, 与织构的形成有关; 陶瓷型试样的高温持久性优于石墨型, 在 400、430、460 $^\circ\text{C}$ 下, 持久寿命分别提高了 1.174%、15.401%、6.998%, 均为韧性断裂, 其微观形貌为韧窝特征。此外, 温度直接影响 TC4 钛合金的持久寿命, 随着温度升高, TC4 钛合金的持久寿命逐渐降低。

关键词: TC4 钛合金; 铸型; 微观组织; 织构; 高温持久性

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)08-2880-08

TC4 钛合金具有密度小、比强度高、导热系数小、热稳定性好和耐腐蚀性强等特点, 广泛应用于航空航天和生物医疗等领域^[1-3], 是目前航空航天应用量较大的钛合金材料, 尤其在航空发动机、飞机机身、航空紧固件等方面。因此优化 TC4 钛合金的性能一直是当前研究的重点内容^[4,5]。

织构是多晶体的取向分布状态偏离随机分布状态, 呈现一定的规则性。织构的存在能够使材料的力学性能、电磁性能、光学性能、耐腐蚀性能发生明显差异^[6,7]。刘征等^[8]通过电子束快速成形技术制备了钛合金, 研究了织构对 TC4 钛合金拉伸性能的影响。Li 等^[9]分析了 Ti-3Al-2.5V 合金管轴向拉伸过程中的织构演变, 揭示了收缩应变比(CSR)与织构演变的内在联系。Xu 等^[10]研究了静磁场深冷处理工艺对 TC4 钛合金织构和性能的影响, 发现深冷和静磁场深冷处理都促进了钛合金中 $\alpha \rightarrow \beta$ 的转变, 且深冷处理弱化了 $\{0001\}$ 方向的织构, 而静磁场深冷处理强化了该方向

的织构。所以研究钛合金成型中织构存在相当重要。但对于不同钛合金铸造工艺对织构分析还不是很充分, 所以不同铸型工艺对钛合金织构的影响是值得研究的。同时 TC4 钛合金的高温性能一直是目前研究的重点^[10,11]。李晋炜^[12]研究了 Ti-60 合金电子束焊接接头的显微组织及稀土相的分布特征, 讨论了影响接头疲劳性能的主要因素。周海彬等^[13]分析 Ti-4Al-2V 钛合金高温高周疲劳性能。Ju 等^[14]研究了 Si 元素对 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 钛合金高温持久性的影响。王旭等^[15]分析不同时效处理的固溶态 Ti65 高温钛合金的室温拉伸性能和 650 $^\circ\text{C}$ 拉伸性能、持久性能、抗蠕变性能以及热稳定性能。因此, 对不同铸型下 TC4 钛合金的高温持久性探究是值得分析的问题。本研究对 TC4 钛合金采用不同铸型处理, 分析了不同铸型工艺对微观组织、织构和高温持久性的影响, 为 TC4 钛合金的质量优化提供一定的参考价值。

1 实 验

收稿日期: 2020-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(51875452, 51804251); 陕西省重点研发计划项目(2018YBXM-G-3-2, 2017TSCXL-GY-05-01)

作者简介: 刘文杰, 男, 1993 年生, 硕士, 西安科技大学机械学院, 陕西 西安 710054, E-mail: 2051084790@qq.com

实验材料为 TC4 钛合金,其化学成分如表 1 所示,分别采用石墨型和陶瓷型进行铸造成型,均采用相同的熔炼浇注工艺,其熔炼浇注在真空度 4 Pa 下,熔炼电压为 50 V,熔炼浇注电流为 20 kA,型壳预热温度为 400 °C,浇注温度为 1730 °C。

取浇铸后成型的试样轴向剖面进行组织测试分析,观测区域为轧向 RD 和横向 TD 组成的平面,法向 ND (浇铸向)垂直于观测平面。采用电镜上配备有 SEM-EBSD 系统的 JSM-7001F 型场发射扫描电镜进行 EBSD 观察;采用 X 射线衍射仪进行物相分析;对观测后试样进行成型方法和侧向研磨抛光,利用腐蚀剂 10%HF+20%HNO₃+70%H₂O 腐蚀 30 s 后观察其金相组织;在 HB5150-1996《金属高温拉伸持久试验方法》标准下,利用机械式持久试验机进行试样在不同铸型(陶瓷型、石墨型)、不同温度(400、430、460 °C)条件下的持久性试验,直至试样断裂,最后观察其断口形貌。

2 结果与分析

2.1 微观组织与结构

由图 1a, 1b 可知,陶瓷型试样微观组织是由大量的层状 α 相和少量 β 相组成,层状 α 相粗大,晶界内

生长方向一致且内部无孔洞缺陷。由图 1c, 1d 可知,石墨型试样微观组织也是由层状 α 相和少量 β 相组成,但晶内层状 α 相细小,间距短且去向较多。与石墨型相比,陶瓷型晶粒直径大,晶粒均匀相对稳定,有一定的取向。这是由于陶瓷铸型散热慢,金属内部冷却速度低,促进了层状 α 相生长^[16]。

由图 2a 可知,陶瓷型在 xoy 面有很多粗大等轴晶,晶粒直径较大,晶粒度小, α 相在 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向有一定取向。由图 2b 可知,石墨型试样晶粒成长相对不均匀,晶粒直径分布差异较为明显,同时存在大量细小的晶粒,晶界明显较多,直接影响 TC4 钛合金的力学性能。图 2c 为陶瓷型试样的晶粒尺寸分布图,陶瓷型晶粒平均直径(d_{mean})为 37.021 μm ,最大晶粒直径(x_{max})为 188.83 μm ,最小晶粒直径(x_{min})为 17.629 μm ,晶粒离散程度(s_{sd})为 24.491,相邻直径晶粒数量差异值相对稳定,晶粒分布相对稳定。由图 2d 可知,石墨型晶粒平均直径(d_{mean})为 35.615 μm ,最大晶粒直径(x_{max})为 323.08 μm ,最小晶粒直径(x_{min})为 16.749 μm ,晶粒离散程度(s_{sd})为 28.036,相邻直径的晶粒数量差异值相对不稳定。这说明陶瓷型与石墨型对比,晶粒平均直径提高了 3.95%,晶粒均匀差异明显,离散程度低,晶界相对较少,最大晶粒和最小晶粒差异小,有一定择优生长。同时由于晶粒大小、组织均匀程度和织构对力学性能有直接的影响^[17,18],根据 Hall-Petch 关系可知:

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy ($\omega/\%$)							
Al	V	Si	Fe	C	H	O	Ti
6.19	4.18	0.010	0.059	0.009	0.003	0.177	Bal.

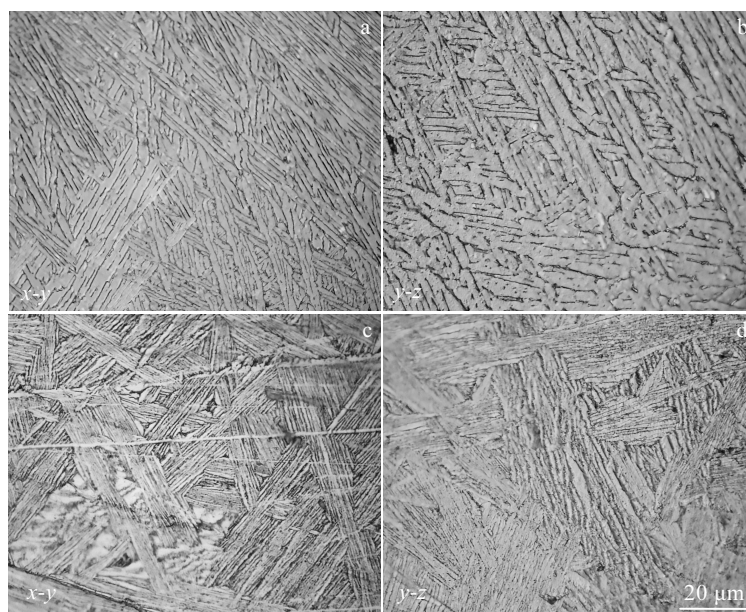


图 1 TC4 钛合金铸型样品的光学显微组织

Fig.1 Optical micrographs of ceramic-moulded (a, b) and graphite-moulded (c, d) TC4 titanium alloy samples: (a, c) x-y plane and (b, d) y-z plane

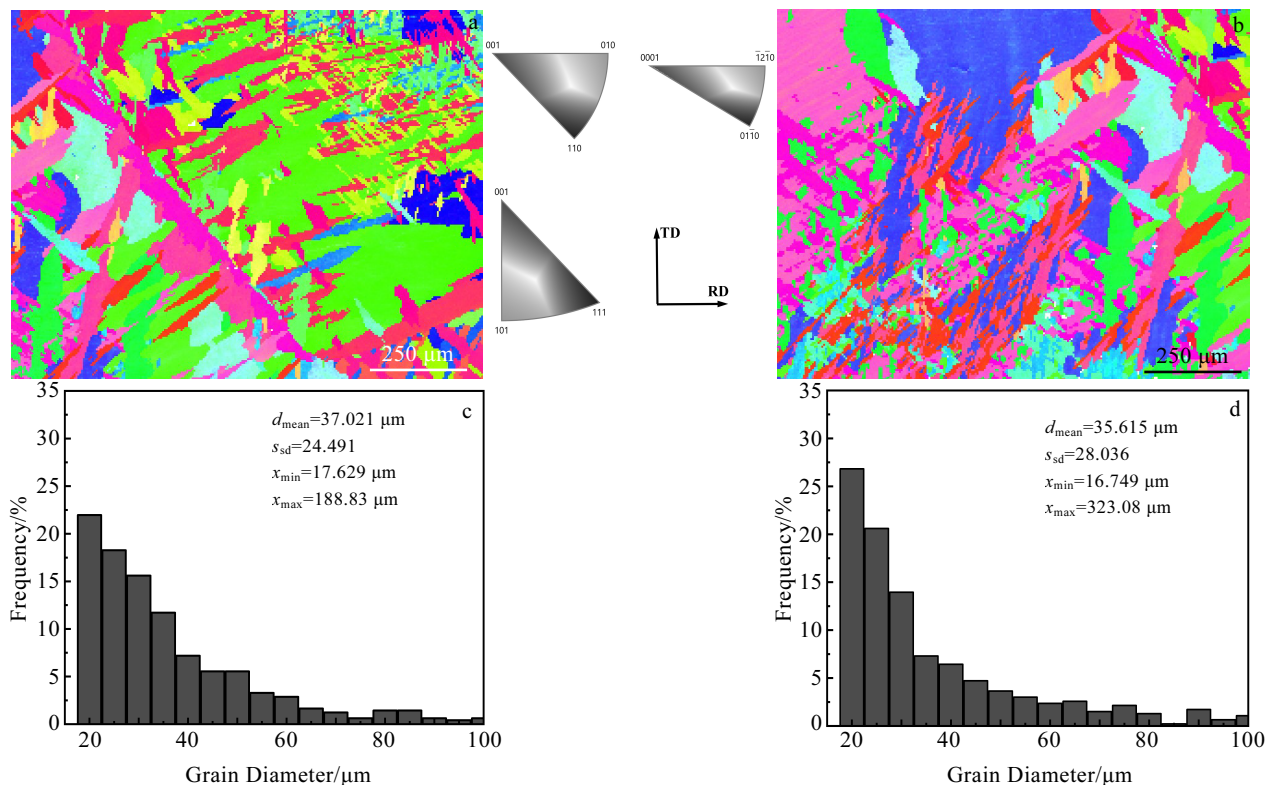


图 2 陶瓷型和石墨型 TC4 钛合金的取向分布图以及晶粒尺寸分布图

Fig.2 Orientation distribution (IPF) (a, b) and grain diameter distribution (c, d) for ceramic-moulded (a, c) and graphite-moulded (b, d) TC4 titanium alloy

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, σ_s 为屈服强度, σ_0 和 K 代表材料相关系数, K 表征晶界对强度影响的程度系数, d 为晶粒大小。根据位错理论, 晶界是位错运动, 应力集中在晶界, 由于位错堆积的形成, 当应力足够大, 导致滑移从一个

晶粒扩展到另一个晶粒时, 就会发生屈服^[19], 从定量的角度上, 进一步验证了前期研究工作 (不同铸型对室温拉伸性能影响)。所以不同铸型工艺直接影响晶粒大小、组织均匀程度, 间接导致力学性能的差异。

图 3 为 EBSD 分析得到的取向差分布图, 其中低角度晶界(LAGBs, $\theta \leq 15^\circ$)、高角度晶界($\theta > 15^\circ$)分别

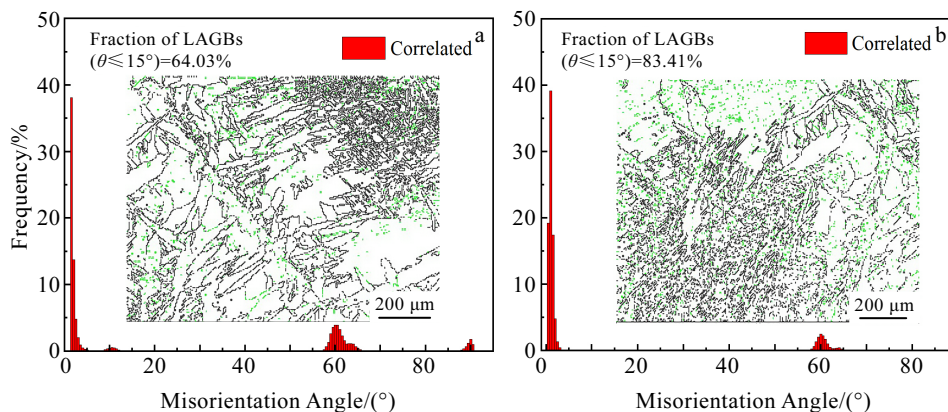


图 3 TC4 钛合金的取向差和晶界分布图

Fig.3 Misorientation angle and grain boundary distribution of ceramic-moulded (a) and graphite-moulded (b) TC4 titanium alloy

用绿色、黑色表示。从图 3 中可以看出,陶瓷型的低角度晶界占 64.03%,石墨型占 83.41%,很明显陶瓷型低于石墨型,均匀性相对高于石墨型。众所周知,低角度晶界是由于大量变形造成的,反映了位错的变形程度,低角度晶界越多,位错越多,强度升高,而高角度晶界通常表示为再结晶晶界。所以陶瓷型低角度晶界少,分布均匀,获得强度与塑性较好的匹配。

在作者前期研究中^[16],借助仿真模拟得到 2 种铸型方式下铸件的冷却曲线如图 4 所示。其中粉红色、黑色、蓝色分别表示铸件顶部、底部、中间位置。曲线各点的斜率代表铸件不同时刻的瞬时冷却速度,两点之间的斜率代表铸件在该时段的平均冷却速度。因此陶瓷型 3 个位置单位时间内温度差均小于石墨型。

根据平均冷却速度公式:

$$\varepsilon = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2)$$

得出 2 种铸型的冷却速度如图 5 所示^[16]。陶瓷型和石墨型的冷却速度分别为 0.835 ± 1.053 °C/s、 1.26 ± 0.086

°C/s。与石墨型相比,陶瓷型的冷却速度低,这说明了瓷铸型中 ZrO_2 、 Y_2O_3 以及煤矸石具有保温作用,与钛液发生化学反应伴随着热量散出,热量的散出减缓凝固速度,因此冷却速度低于石墨型^[16]。

在图 6 中,蓝色区域代表 α 相、红色区域代表 β 相、黄色区域代表 Titanium cubic 相以及绿色区域为 Ti(1223)相。由图 6 可知,陶瓷型和石墨型的主要物相为 α 相,其中陶瓷型试样的 α 相占了 91.68%, β 相占了 1.23%;石墨型试样的 α 相占了 86.38%, β 相占了 2.65%。与石墨型相比,陶瓷型 α 高了 5.3%。这是由于陶瓷型的晶粒大于石墨型,原始 β 晶粒晶界减少,所以导致陶瓷型的 α 相层状结构较多。同时 α 相与 β 相比比例对钛合金力学性能有影响,当组织 α 相比比例增大(即 β 相比比例减少)时,材料强度减小,这是由于等轴状 α 相尺寸较大,晶界较少,材料塑性变形时运动位错遇到的阻碍也较少,导致塑变过程中流变应力(强度)也较小^[20-22]。不同铸型工艺影响 α 相和 β 相含量。同时, α 相与 β 相差异导致力学性能的差异,进一步

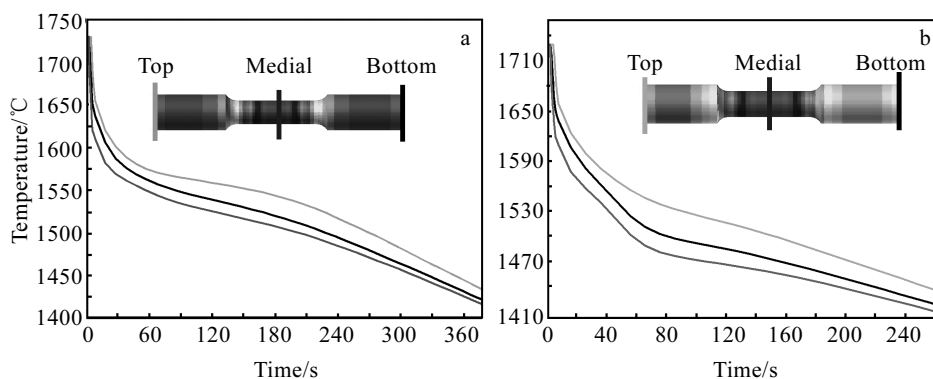


图 4 2 种铸型方式下铸件的冷却曲线

Fig.4 Cooling curves of castings in two shell casting moulds: (a) ceramic and (b) graphite^[16]

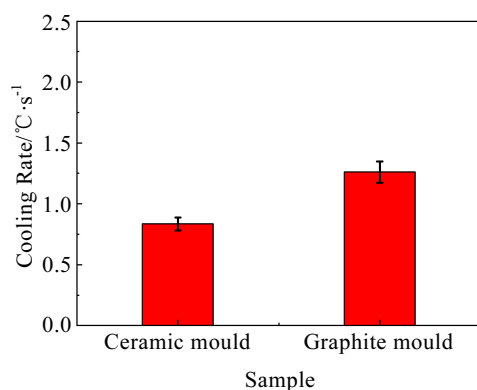


图 5 不同铸壳的冷却速度

Fig.5 Cooling rates of different casting moulds

从相的角度验证了铸型对强度和韧性的影响。

由图 7 可知,由于铸造成型过程中 TC4 钛合金一般冷却速度处于 1~20 °C/s,所以属于缓慢冷却,发生 α 相变 ($\beta \rightarrow \alpha$),在 XRD 中不存在与 α 相同的 hcp 晶体结构的 α' ^[23]。

通过 XRD 图谱(图 8)可知,陶瓷和石墨铸型试样的物相均为 α 相(hcp)、 β (bcc) 相和 ω 相(hcp)组成。在图 8 中,将陶瓷和石墨型的试样衍射峰进行对比,陶瓷型试样的(100)、(002)、(101)的衍射峰大小发生了明显的改变。与石墨型对比,(100)、(002)衍射峰峰值提高了 2.5 倍左右,(101)峰强提高了 3.75 倍左右,其他衍射峰强度也有一定改变,其中(100)、(002)、(101)三强峰的变化最为明显。(100)、(002)、(101)峰强

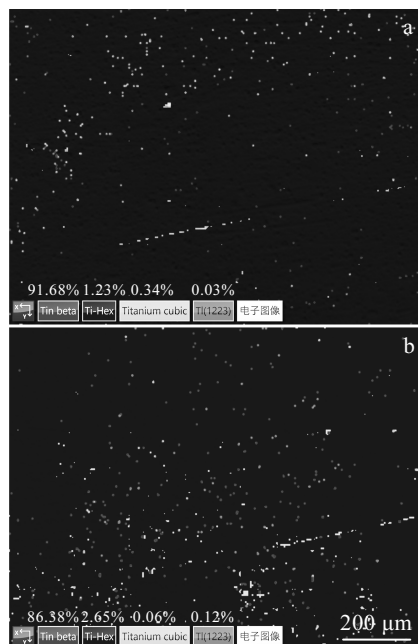


图 6 不同铸型样品的 EBSD 相图

Fig.6 EBSD phase diagrams of different cast moulds samples:

(a) ceramic and (b) graphite

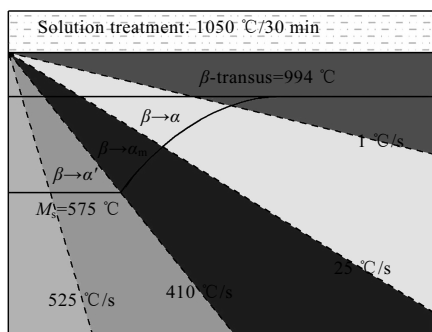


图 7 不同冷却速率下的相变函数

Fig.7 Phase transition at different cooling rates^[23]

的增加, 表明了不同铸型工艺对织构形成有一定影响。

TC4 钛合金的显微组织中的 α 片层由母相 β 转变而来, 遵从 $\{110\}\beta//\{0001\}\alpha$ 、 $\langle 111 \rangle\beta//\langle 11\bar{2}0 \rangle\alpha$ ^[24] 关系。织构存在对力学、电磁、光学、耐腐蚀性能方面有显著的影响^[25,26]。由图 6 EBSD 分析可知, 2 种铸造成型 TC4 合金中 α 相含量较高, 约为 90%。图 9 为不同铸型 TC4 钛合金 α 相极图。由图 9a 可知, α 相的 $\{0001\}$ 存在 6 个强度较高的取向, 3 个与 y 方向呈约 45° 的夹角, 2 个与 y 方向呈约 90° 的夹角, 剩余 1 个与 y 方向呈接近 0° 的夹角, 尤其在与 y 方向呈约 45°

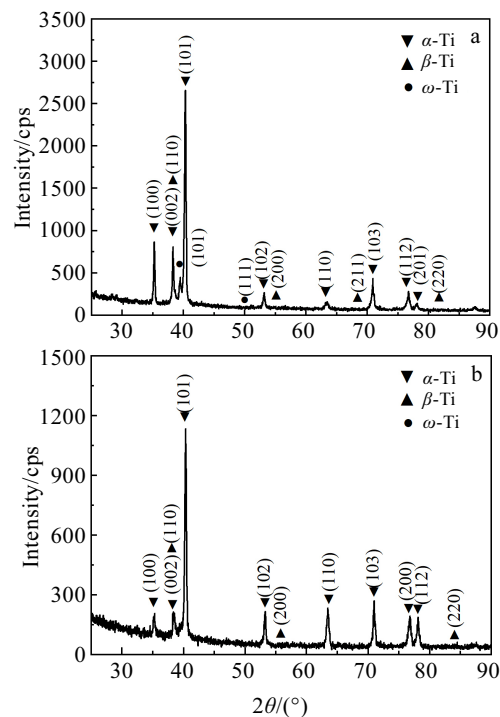
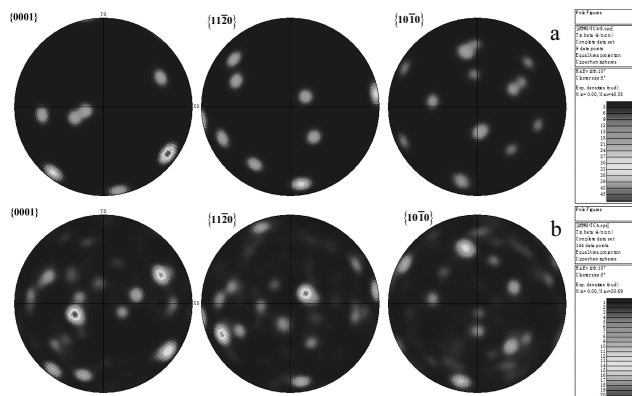


图 8 不同铸型样品的 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of different cast moulds samples:

(a) ceramic and (b) graphite

图 9 不同铸型下 TC4 钛合金 α 相极图Fig.9 α -phase pole figures of TC4 titanium alloy under different

casting moulds: (a) ceramic and (b) graphite

的夹角最强, 织构为 $\{11\bar{2}0\}\langle 1\bar{1}00 \rangle$, 织构强度为 45.56。由图 9b 可知, α 相的 $\{0001\}$ 存在 6 个强度较高的取向, 4 个与 y 方向呈约 45° 的夹角, 2 个与 y 方向呈约 90° 的夹角, 尤其在与 y 方向呈约 90° 的夹角最强, 织构为 $\{0001\}\langle \bar{1}011 \rangle$, 织构强度为 20.69。所以, 陶瓷型试样在 xoy 面的织构类型为 $\{11\bar{2}0\}\langle 1\bar{1}00 \rangle$, 与 y 方向呈约 45° 的夹角, 进一步验证了图 8 中陶瓷型

试样(100)、(002)、(101)峰强的增加与组织形成有关。这说明了金属凝固成型中,不同铸型对晶粒择优生长具有一定的影响。尤其是陶瓷型的组织强度高,取向明显。

2.2 高温持久性分析

由图 10 可知,不同温度(400、430、460 °C)下,陶瓷型 TC4 钛合金的持久寿命分别是 183.53、159.6、116.2 h,与石墨型相比,分别提高了 1.174%、15.401%、6.998%,这说明陶瓷型试样的高温持久性要比石墨型的好,陶瓷型试样适合于 TC4 在高温条件下应用。这是由于陶瓷型晶粒尺寸增大,晶界面积减少,持久断裂沿晶扩展的通道较少,因而持久寿命提高^[27]。因此陶瓷型试样的寿命长塑性好。在陶瓷型(石墨型)工艺下,随着温度升高,TC4 钛合金的持久寿命逐渐降低,温度直接影响 TC4 钛合金的持久寿命。在不同铸

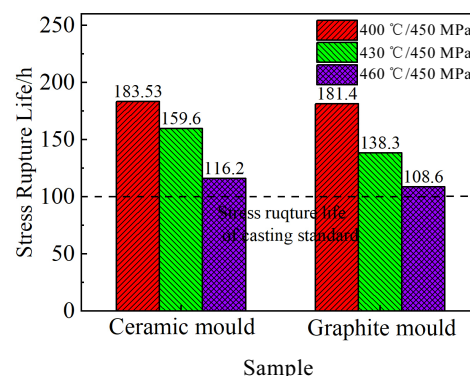


图 10 不同铸型及温度下 TC4 钛合金的持久寿命

Fig.10 Stress rupture life of TC4 titanium alloy under different casting moulds and temperatures

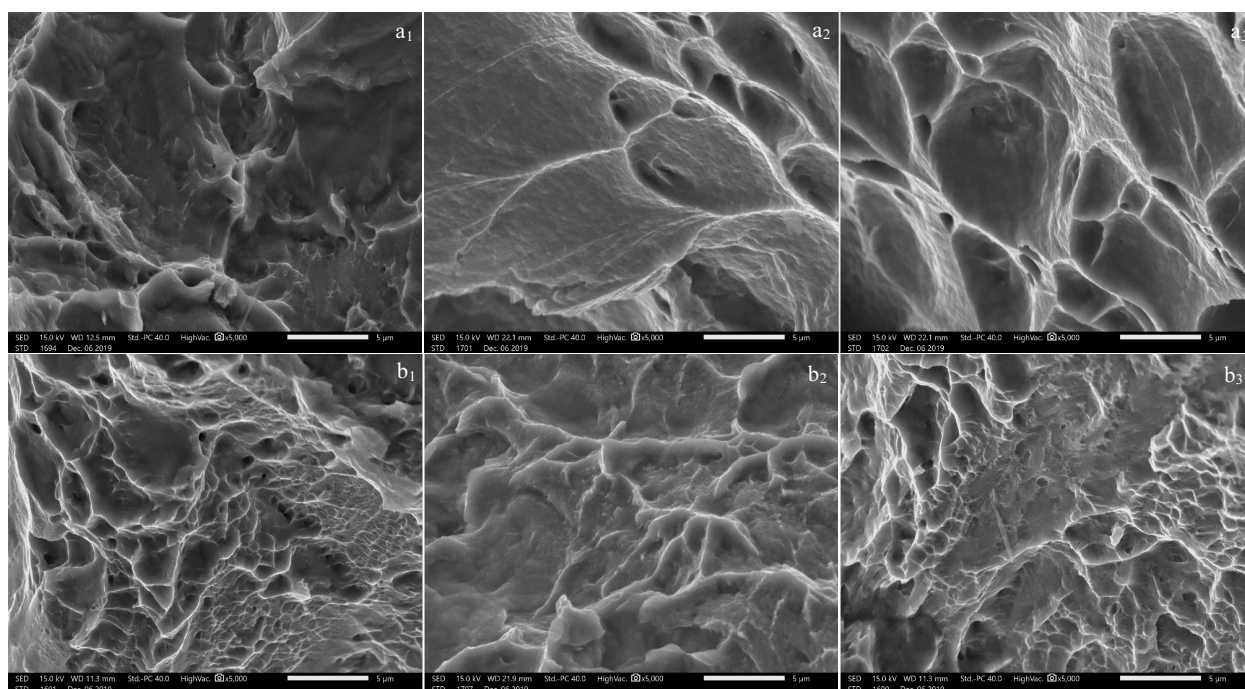


图 11 不同铸型及温度下持久实验断裂后 TC4 钛合金断口形貌

Fig.11 Fracture morphologies of ceramic-moulded ($a_1 \sim a_3$) and graphite-moulded ($b_1 \sim b_3$) TC4 titanium alloy after stress rupture test at different temperatures: (a_1, b_1) 400 °C, (a_2, b_2) 430 °C, and (a_3, b_3) 460 °C

型工艺和温度条件下,TC4 钛合金的持久寿命均高于标准铸件水平^[28],这说明陶瓷型和石墨型工艺试样具有良好的持久性。

从图 11 $a_1 \sim 11a_3$ 可以看出,陶瓷型试样在不同温度下持久断裂后断口晶面存在较大韧窝,随着温度升高,韧窝的数量增多,同时宽度变小,均属于韧性断裂。从图 11 $b_1 \sim 11b_3$ 可以看出,石墨型试样在不同温度持

久断裂后断口晶面存在大量小韧窝,韧窝的数量较多,同时宽度小,均属于韧性断裂。与石墨型相比,陶瓷型的韧窝大且深。说明陶瓷型高温持久塑性明显高于石墨型,均为韧性断裂,其微观形貌表现为韧窝特征。

3 结 论

1) 不同铸型工艺对 TC4 钛合金微观组织有显著

的影响。陶瓷型试样晶粒平均直径大 ($d_{\text{mean}}=37.021\ \mu\text{m}$), 晶粒均匀相对稳定; 而石墨型试样晶粒平均直径小 ($d_{\text{mean}}=35.615\ \mu\text{m}$), 晶粒直径差异较为明显, 同时存在大量细小的晶粒, 小角度晶界明显较多。

2) 陶瓷型和石墨型成型的 TC4 钛合金的物相均由 α 相、 β 相和 ω 相组成, 其中主要物相为 α 相。与石墨型相比, 陶瓷型有利于 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变, α 相高出 5.3%。同时, α 相与 β 相差异导致力学性能有显著的影响, 当 α 相比比例增大时, 材料强度减小, 塑性升高。

3) 不同铸型工艺对织构具有一定的影响。尤其是陶瓷型的织构强度高, 取向明显, 织构类型为 $\{11\bar{2}0\}\langle 1\bar{1}00\rangle$, 与 y 方向呈约 45° 的夹角, 进一步验证了陶瓷型试样在 (100)、(002)、(101) 峰强增加与织构的形成有关。

4) 陶瓷型试样的高温持久性优于石墨型, 在不同温度 (400、430、460 $^\circ\text{C}$) 下, 持久寿命分别提高了 1.174%、15.401%、6.998%, 均为韧性断裂, 其微观形貌为韧窝特征。同时, 温度直接影响 TC4 钛合金的持久寿命, 随着温度升高, TC4 钛合金的持久寿命逐渐降低。

参考文献 References

- [1] Liu X Y, Chu P K, Ding C X. *Materials Science and Engineering R*[J], 2004, 47(3-4): 49
- [2] Jin Hexi(金和喜), Wei Kexiang(魏克湘), Li Jianming(李建明) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(2): 280
- [3] Gorynin I V. *Materials Science & Engineering A*[J], 1999, 263(2): 112
- [4] Cheng Xiaole(成小乐), Zhou Sijun(周思君), Fu Hanguang(符寒光) *et al. Journal of Xi'an Jiaotong University*(西安交通大学学报)[J], 2019, 53(3): 111
- [5] Jung J H, Choi J, Lee B S *et al. Materials Science and Technology*[J], 2019, 35(3): 248
- [6] Huang Xu(黄旭), Li Zhenxi(李臻熙), Gao Fan(高帆) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2014(7): 70
- [7] Erdely P, Staron P, Maawad E *et al. Acta Materialia*[J], 2017, 216: 145
- [8] Liu Zheng(刘征), Liu Jianrong(刘建荣), Zhao Zibo(赵子博) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(6): 692
- [9] Li Zhixin, Zhan Mei, Guo Kun *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(11): 3169
- [10] Xu Weifeng, Zhang Zhenlin. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(12): 3135
- [11] Zuo Yongji(左永基), Liu Xiaogang(刘小刚). *Journal of Chongqing University of Technology, Natural Science*(重庆理工大学学报, 自然科学)[J], 2019, 33(5): 59
- [12] Li Jinwei(李晋炜), Zuo Congjin(左从进), Chen Zhiyong(陈志勇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(S3): 220
- [13] Zhou Haibing(周海彬), Cong Ru(熊茹), Liu Guiliang(刘桂良) *et al. Nuclear Power Engineering*(核动力工程)[J], 2012, 33(5): 124
- [14] Ju Jiantao, Wang Yue, Hao Fang *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(6): 1749
- [15] Wang Xu(王旭), Li Siqing(李四清), Li Zhenxi(李臻熙) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2013, 23: 477
- [16] Zong Xuewen(宗学文), Liu Wenjie(刘文杰), Gao Zhongtang(高中堂) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(5): 1681
- [17] Liu Zhangguang, Li Peijie, Xiong Liangtong *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 680: 259
- [18] Lv Xudong, Wen Bo, Du Jinhui. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(5): 1386
- [19] Hansen N. *Scripta Materialia*[J], 2004, 51(10): 801
- [20] Xu Yuan(徐媛), Sun Kun(孙坤), Zhong Wei(钟卫) *et al. Journal of Yunnan University, Natural Sciences Edition*(云南大学学报, 自然科学版)[J], 2012, 34(3): 320
- [21] Yao Zekun(姚泽坤), Guo Hongzhen(郭鸿镇), Su Zuwu(苏祖武) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2000, 29(5): 340
- [22] Wang Xiaoyan(王晓燕), Liu Jianrong(刘建荣), Lei Jiafeng(雷家峰) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2007, 43(11): 1129
- [23] Liu S Y, Shin Y C. *Materials and Design*[J], 2019, 164: 107552
- [24] Leey E, Banerjee R, Kary S *et al. Philosophical Magazine A*[J], 2007, 87: 3615
- [25] Fu Junwei, Li Feng, Sun Jiajun *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 738: 335
- [26] Zhang Wangfeng(张旺峰), Wang Yuhui(王玉会), Li Yan(李艳) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(7): 1239
- [27] Yang Yurong(杨玉荣), Liang Xuefeng(梁学锋), Cai Bocheng(蔡伯成) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 1996, 16(2): 38
- [28] Yu Xiaolu(余小鲁), Li Fuguo(李付国). *Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2010, 35(3): 19

Effect of Different Cast Moulds on the Microstructure, Texture and Stress Rupture of TC4 Titanium Alloy

Liu Wenjie¹, Zong Xuwen^{1,2}, Chen Zhen², Yang Yumeng³, Yang Xuedong⁴, Lu Bingheng²

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(3. AVIC Optoelectronic Technology Co. Ltd, Luoyang 471023, China)

(4. The 725th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Luoyang 471026, China)

Abstract: The effect of different casting moulds on Ti-based alloys such as TC4 is very significant. The microstructures, texture and high-temperature stress rupture of different cast-mould TC4 alloys were investigated by the optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), electron back scattering diffraction (EBSD), and X-ray diffraction (XRD). The persistent fracture behavior of TC4 alloys was studied. The results show that all TC4 alloy samples of different moulds are composed of α phase, β phase and ω phase, and α phase (around 90% in the matrix) is the main phase. Compared with the graphite-moulded TC4 alloy, the ceramic-moulded TC4 alloy is much more beneficial to $\beta \rightarrow \alpha$ phase transition; therefore, the percentage of α phase is higher (by around 5.3%) and its average grain size is larger ($d_{\text{mean}}=37.021 \mu\text{m}$) than those of graphite-moulded TC4 alloys, and distribution of grains is relatively uniform and stable. With the increase of α phase percentage, the strength of TC4 alloys decreases and the plasticity increases. Simultaneously, the ceramic-moulded TC4 alloy has strong texture and obvious orientation, and the texture type is $\{11\bar{2}0\}<1\bar{1}00>$ with an angle of 45° along y direction, which further verifies that the texture of samples is related to the enhancement of peaks in (100), (002), (101) directions. The stress rupture of ceramic-moulded TC4 alloy samples at high temperature is better than that of graphite-moulded TC4 alloys. At the temperatures of 400, 430, and 460 °C, the stress rupture life of the samples which show ductile fracture and dimple appearance in rupture is increased by 1.174%, 15.401%, 6.998%, respectively. In addition, temperature directly affects the high-temperature stress rupture of TC4 titanium alloy. As the temperature increases, the stress fracture life of TC4 titanium alloy gradually decreases.

Key words: TC4 titanium alloy; mould; microstructure; texture; high temperature stress rupture

Corresponding author: Zong Xuwen, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China, E-mail: a15236617652@163.com