

BASCA 热处理对 TB18 钛合金显微组织和力学性能的影响

周伟¹, 辛社伟¹, 刘向宏², 冯军³, 李少强², 张新全³, 王凯旋², 王涛², 杨晶²

- (1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)
(2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)
(3. 中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089)

摘要: 研究了 TB18 钛合金棒材经 β 固溶缓慢冷却时效 (BASCA) 热处理后的显微组织和力学性能。结果表明, TB18 钛合金棒材在 β 相区固溶后缓慢冷却条件下, α 相在 β 晶界和晶内均有析出, 晶内 α 相呈点状或短针状, 晶界 α 相基本呈薄膜状镶嵌在 β 晶界上。冷却速度对晶界 α 相影响较大, 当冷却速度为 1 °C/min 时, 晶界 α 相以透镜状在晶界上不连续析出, 形成“项链”组织。随着冷却速度的降低, 析出的晶界 α 相越来越多且相互连接为一体, 并逐渐粗化呈连续的波浪状。缓慢冷却后形成的晶界 α 相相对合金塑性和韧性不利, 随着冷却速度的减小, 合金塑性和韧性均降低。TB18 钛合金棒材经过 β 相区固溶空冷 + 时效处理后, 可获得在抗拉强度接近 1300 MPa 的水平下, 延伸率达到 8%, 断裂韧性超过 80 MPa·m^{1/2} 的优异综合性能。

关键词: TB18 钛合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)05-015-06

Effect of BASCA Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of TB18 Titanium Alloy

Zhou Wei¹, Xin Shewei¹, Liu Xianghong², Feng Jun³, Li Shaoqiang², Zhang Xinquan³, Wang Kaixuan², Wang Tao², Yang Jing²

- (1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)
(2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)
(3. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of TB18 titanium alloy bar under β annealing, slow cooling and aging (BASCA) heat treatment were studied. The results show that the α phase precipitates under the condition of slow cooling after solid solution. The intragranular α phase is spot-like or short needle, and the α phase in the grain boundary is basically embedded in the β grain boundary as a thin film. The cooling rate has a great influence on the grain boundary α phase. When the cooling rate is 1 °C/min, the grain boundary α phase precipitates discontinuously on the grain boundary in the shape of a lens, forming a “necklace” structure. With the decrease of the cooling rate, more and more grain boundary α phases are precipitated, which are connected to each other and coarsened gradually in a continuous wavy shape. The grain boundary α phase formed after slow cooling has adverse effects on the plasticity and toughness of the alloy. With the slowing down of the cooling rate, the plasticity and toughness of the alloy are reduced. The tensile strength of TB18 titanium alloy bar exhibits excellent comprehensive properties with a tensile strength close to 1300 MPa, an elongation of 8%, and a fracture toughness exceeding 80 MPa·m^{1/2} under β phase zone solid solution air cooling and aging heat treatment process.

Keywords: TB18 titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical properties

钛合金具有比强度高、耐蚀性好等优点, 在航空

航天、汽车和船舶等领域得到广泛的应用^[1-2]。与 $\alpha+\beta$ 钛合金相比, β 钛合金具有更高的比强度、良好的加工性、深淬透性以及抗裂纹扩展能力, 因此 β 钛合金

收稿日期: 2023-04-28

通信作者: 周伟 (1978—), 女, 教授级高工。

常作为结构材料替代高强度钢,达到构件减重效果^[3]。经过几十年的发展, β 钛合金的应用已获得重大突破。TB18 钛合金是近年来西部超导材料科技股份有限公司联合国内高校与科研院所针对我国航空结构件发展需求设计开发的一种新型亚稳 β 钛合金^[4]。与 BT22、Ti-1023 等钛合金相比,该合金具有更好的淬透性以及更加优异的热加工性,用其制作的大规格棒材经热处理后强度超过 1300 MPa 时仍具有优异的韧性 ($K_{IC} \geq 60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$),特别适合作为飞机起落架、横梁等航空工业重要的承载部件。

随着航空航天飞行器向着高速化发展,不仅要求钛合金的强度水平提高,而且对钛合金的韧性也提出了更高的要求^[5],即在提高钛合金强度的同时,韧性也要保持较高的水平。与 $\alpha+\beta$ 热处理相比, β 热处理后由于晶界的存在会阻碍位错运动,使合金强化。同时由于晶内片层组织中存在大量交错排列的片层 α 集束,裂纹穿过这些 α 集束时位向会发生改变,导致裂纹路径曲折、分支多、总长度增加,发生断裂需要更多的能量,因而合金具有更高的断裂韧性^[6]。因此 β 热处理能够在获得较高强度的同时,使钛合金具有优异的断裂韧性,是解决钛合金强度和韧性矛盾的有效途径。 β 固溶缓慢冷却时效 (BASCA) 热处理工艺^[7]是针对高强钛合金薄壁航空结构件降低损伤敏感性,使其获得高强度和高韧性的一种 β 热处理工艺。为此,研究了 BASCA 热处理对 TB18 钛合金显微组织和力学性能的影响,以期制定合适的强化热处理工艺提供依据。

1 实验

实验材料为西部超导材料科技股份有限公司采用 $\alpha+\beta$ 相区锻造工艺生产的 $\phi 400 \text{ mm}$ TB18 钛合金棒材,金相法测得其 β 相转变温度为 $(800 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。TB18 钛合金棒材化学成分见表 1,其组织为典型的锻态组织,有较多等轴状 α 相和少量短棒状 α 颗粒弥散分布于 β 转变组织中,如图 1 所示。

表 1 TB18 钛合金棒材化学成分 (w%)

Table 1 Chemical composition of TB18 titanium alloy bar						
Al	Mo	V	Cr	Nb	Fe	Ti
4.2	4.72	4.75	5.72	1.06	0.18	Bal.

从 TB18 钛合金棒材上切取拉伸试样和断裂韧性试样,按图 2 所示工艺流程进行 BASCA 热处理。其中,固溶温度为 870°C ,保温 2 h 后采用不同冷却速度 (AC 和 1、0.5、0.25 $^\circ\text{C}/\text{min}$) 冷却至 650°C 后再空冷至室温,时效温度为 530°C ,保温 4 h 后空冷至室

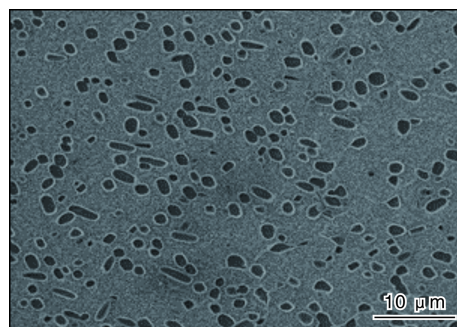


图 1 锻态 TB18 钛合金棒材显微组织

Fig.1 Microstructure of as-forged TB18 titanium alloy bar

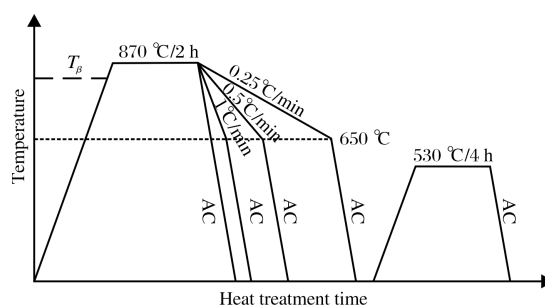


图 2 BASCA 热处理工艺流程图

Fig.2 Flow chart of BASCA heat treatment process

温。采用 INSTRON 5985 万能拉伸试验机进行室温拉伸性能和平面应变断裂韧性测试。采用 Olympus MG3 光学显微镜 (OM) 和 JSM-6700 扫描电子显微镜 (SEM) 进行组织观察。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 3 为 TB18 钛合金在 870°C 保温 2 h 后经不同冷却速度固溶后的显微组织。从图 3 可以看出,与空冷 (AC) 方式相比, TB18 钛合金经 1、0.5、0.25 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 缓慢冷却处理后 β 晶界和晶内均有 α 相析出,晶内 α 相 (α_p) 呈点状或短针状,晶界 α 相 (α_{GB}) 基本呈薄膜状镶嵌在 β 晶界上,显微组织均表现为晶界粗化特征 (图 3b~d)。随着冷却速度的降低, α_p 相含量增加并且尺寸略有增大,晶界粗化现象也更加明显。相比于 α_p 相的析出,缓慢冷却条件更有利于 α_{GB} 相的析出,这是由于 β 晶界结构特殊,容易产生成分波动及杂质富集^[8],会显著降低 β 相的稳定性及析出相形核的势垒,使 α_{GB} 相析出更加容易。

为了进一步探索冷却速度对 α_{GB} 相的影响,选取局部位置放大进行分析。图 4 为 TB18 钛合金经不同冷却速度固溶后 α_{GB} 相的 SEM 照片。由图 4 可见,空冷后晶界上无 α_{GB} 相析出,晶界狭长平直 (图 4a);

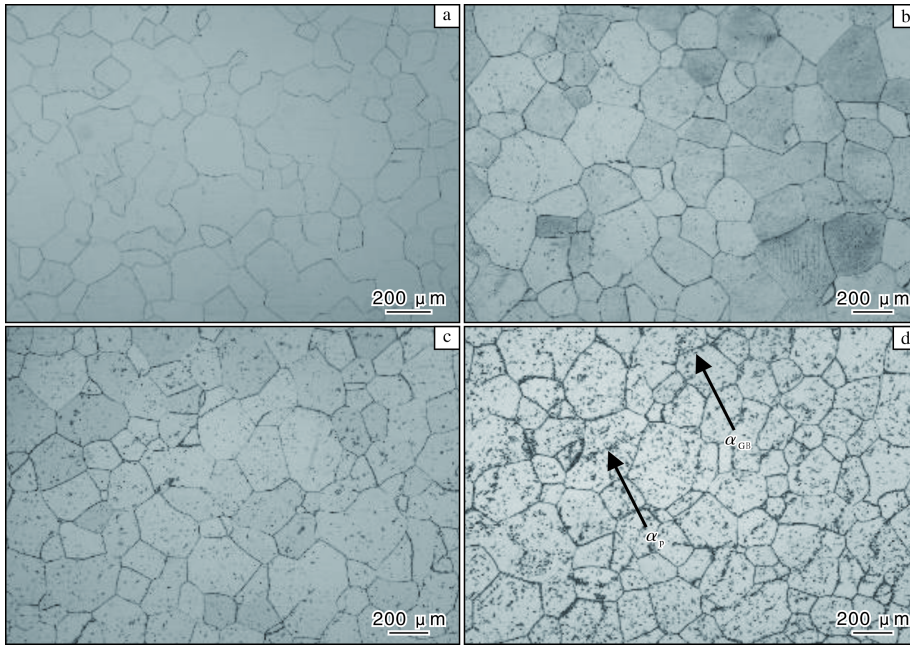


图 3 TB18 钛合金经不同冷却速度固溶后的显微组织

Fig.3 Microstructures of TB18 titanium alloy solution treated at different cooling rates:

(a) AC; (b) 1 °C/min; (c) 0.5 °C/min; (d) 0.25 °C/min

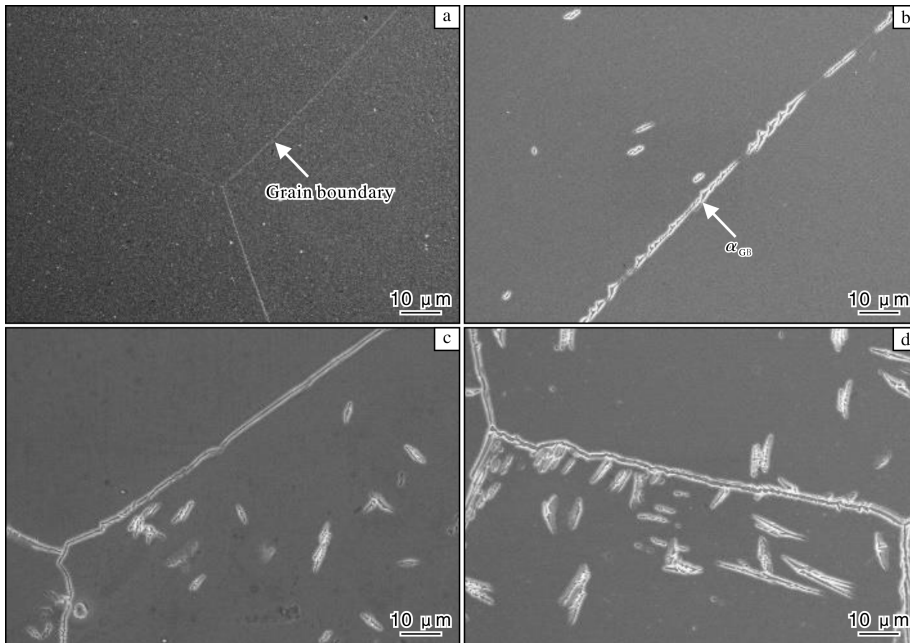


图 4 TB18 钛合金经不同冷却速度固溶后 α_{GB} 相的 SEM 照片

Fig.4 SEM microstructures of α_{GB} phase of TB18 titanium alloy solution treated at different cooling rates:

(a) AC; (b) 1 °C/min; (c) 0.5 °C/min; (d) 0.25 °C/min

1 °C/min 冷却速度下可以发现 α_{GB} 相以透镜状在晶界上不连续析出 (图 4b), 具有这种特征的显微组织被称为“项链”组织^[9]; 随着冷却速度的进一步降低, α_{GB} 相越来越多且相互连接为一体, 如图 4c 所示; 当冷却速度降低至 0.25 °C/min 时, 析出的 α_{GB} 相粗化并呈连

续的波浪状, 如图 4d 所示。

图 5 为 TB18 钛合金经不同冷却速度 BASCA 热处理后的显微组织。从图 5 可以看出, TB18 钛合金经 BASCA 热处理后组织由粗大 β 晶粒及晶内细密次生 α 相 (α_s) 丛域组成, 符合钛合金魏氏组织形貌^[10]。由

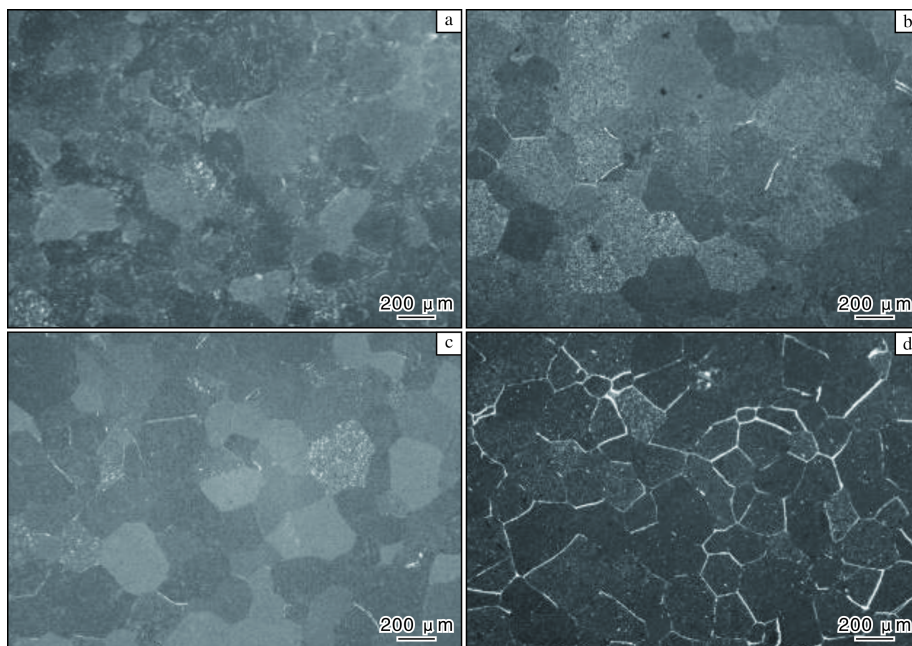


图5 TB18 钛合金经不同冷却速度 BASCA 热处理后的显微组织

Fig.5 Microstructures of TB18 titanium alloy heat treated with BASCA at different cooling rates: (a) AC; (b) 1 °C/min; (c) 0.5 °C/min; (d) 0.25 °C/min

于固溶温度相同, 4 组样品的 β 晶粒尺寸无明显差异。通过高倍 SEM 观察 α_s 相形貌 (图 6) 发现, 由于空冷处理冷却时间短, 产生的过冷度小, 晶核在晶界形成后向晶内平行排列生长 (图 6a), 这种魏氏组织 α_s 片层具有单一的晶体学取向^[11]。晶内形核析出的 α_s 片层

形成网篮组织形态 (图 6b)。缓慢冷却处理过程中由于形成了 α_{GB} 相, 导致晶界附近 α 相不均匀分布^[12], 同时失去了保持单一取向继续生长的可能, 因此 β 晶界附近析出的 α_s 相呈针状 (图 6c), 晶内析出的 α_s 片层长短不一, 相互之间呈网篮状编织 (图 6d)。

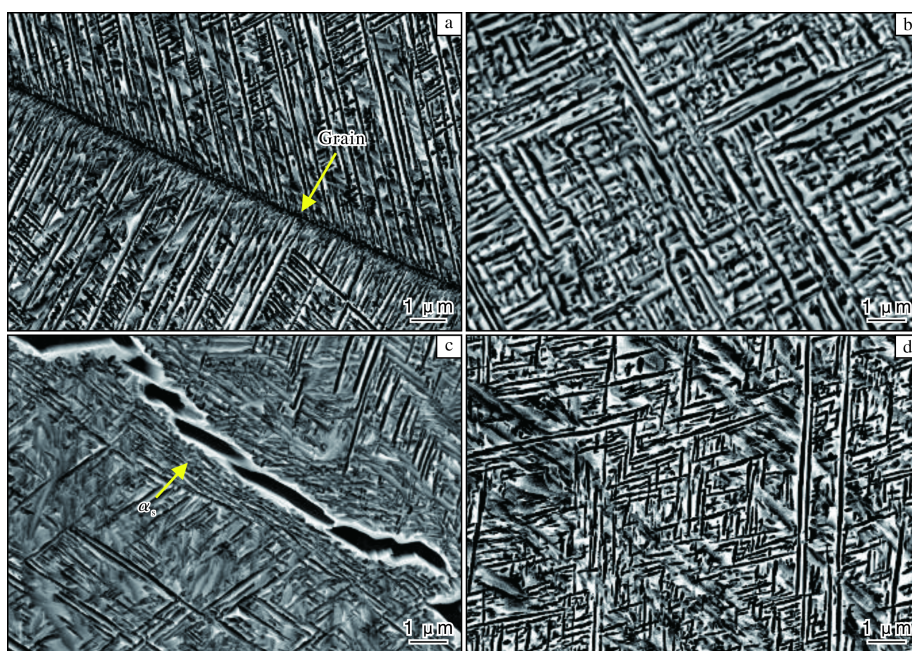


图6 TB18 钛合金经不同冷却速度 BASCA 热处理后的 SEM 照片

Fig.6 SEM microstructures of TB18 titanium alloy heat treated with BASCA at different cooling rates: (a, b) 870 °C/2 h/AC + 530 °C/4 h/AC; (c, d) 870 °C/2 h/FC (0.5 °C/min) to 650 °C/AC + 530 °C/4 h/AC

2.2 力学性能

表 2 为经不同冷却速度固溶处理后 TB18 钛合金的室温拉伸性能。从表 2 可以看出, 固溶处理后的 TB18 钛合金具有很好的塑性, 延伸率在 19.5%~23.0% 之间, 但是强度水平一般, 抗拉强度仅在 798~812 MPa 范围内。这是因为 TB18 钛合金固溶后的组织主要由体心立方 β 相组成, 晶内及晶界无析出或析出的 α 相很少, 对合金几乎没有强化效应。

表 2 经不同冷却速度固溶处理后 TB18 钛合金的室温拉伸性能

Table 2 Room temperature tensile properties of TB18 titanium alloy solution treated at different cooling rates

Cooling rate	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%
AC	804	773	23.0	74
1 °C/min	812	775	19.5	62.5
0.5 °C/min	805	785	20.5	61
0.25 °C/min	798	780	20.0	56

表 3 为 TB18 钛合金经不同冷却速度 BASCA 热处理后的室温力学性能。从表 3 可以看出, 采用 BASCA 热处理工艺能够使 TB18 钛合金获得在抗拉强度接近 1300 MPa 的水平下, 延伸率达到 8%, 断裂韧性超过 $80 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的优异综合性能。时效处理对 TB18 钛合金具有明显的强化效果, 抗拉强度从时效前的 800 MPa 左右提高至 1263~1309 MPa。其强化原因主要是亚稳 β 相通过时效分解成稳定细小密集的 α_s 相, 使合金强度得到大幅提高^[13]。对比表 3 中不同冷却速度下的力学性能还可以发现, 不同冷却速度下 TB18 钛合金强度差异不明显, 但随着冷却速度的降低, 合金塑性呈下降趋势。空冷条件下 TB18 钛合金的延伸率为 8.0%, 冷却速度为 1 °C/min 时延伸率为 6.0%, 当冷却速度为 0.25 °C/min 时延伸率仅 4.0%。材料塑性降低与 α_{GB} 相的析出有关。缓慢冷却后晶界附近析出的 α_s 相和晶内

表 3 经不同冷却速度 BASCA 热处理后 TB18 钛合金的室温力学性能

Table 3 Room temperature mechanical properties of TB18 titanium alloy heat treated with BASCA at different cooling rates

Cooling rate	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%	K_{IC} / $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
AC	1293	1195	8.0	13.5	86.9
1 °C/min	1263	1184	6.0	8.5	71.4
0.5 °C/min	1309	1226	5.5	8.5	62.6
0.25 °C/min	1289	1199	4.0	5.5	57.8

强化 α_s 相之间的高应力差易导致裂纹形核, 并且沿连续的 α_{GB} 相增殖和开裂 (见图 7), 使合金塑性降低。

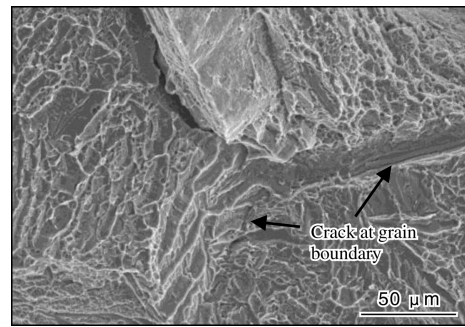


图 7 TB18 钛合金经 BASCA 热处理后拉伸试样的断口形貌

Fig.7 Fracture morphology of TB18 titanium alloy tensile specimen heat treated with BASCA at cooling rate of 0.25 °C/min

从表 3 中的断裂韧性测试结果可以看出, 固溶处理后空冷条件下的断裂韧性最高, K_{IC} 值为 $86.9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。随着冷却速率的降低, 合金断裂韧性值降低, 0.25 °C/min 缓慢冷却条件下, K_{IC} 值仅为 $57.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 差值达到 $29.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 表明 TB18 钛合金断裂韧性对 α_{GB} 相具有较高的敏感性。图 8 为经不同冷却速度 BASCA

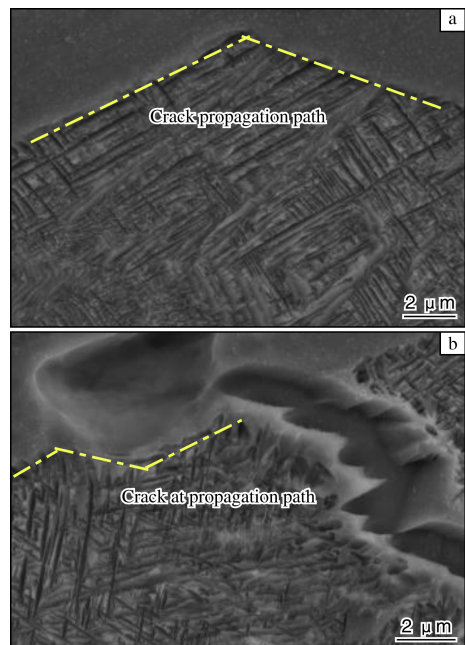


图 8 经不同冷却速度 BASCA 热处理后 TB18 钛合金断裂韧性试样的裂纹扩展路径

Fig.8 Crack propagation paths of TB18 titanium alloy fracture toughness specimens heat treated with BASCA at different cooling rates: (a) AC; (b) 0.25 °C/min

热处理后 TB18 钛合金断裂韧性试样的裂纹扩展路径。从图 8 可以看出,与缓慢冷却相比,空冷处理导致晶界附近形成较大的 α 片层集束,裂纹沿晶界扩展会发生较大的转向,裂纹的有效滑移长度增加,所消耗的能量增多,因此 TB18 钛合金具有较高的断裂韧性。

3 结 论

(1) TB18 钛合金棒材在 β 相区固溶缓慢冷却条件下, α 相在 β 晶界和晶内均有析出,晶内 α 相呈点状或者短针状,晶界 α 相基本呈薄膜状镶嵌在 β 晶界上。冷却速度对晶界 α 相影响较大,当冷却速度为 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 时,晶界 α 相以透镜状在晶界上不连续析出,形成“项链”组织。随着冷却速度的降低,析出的晶界 α 相越来越多且相互连接为一体,并逐渐粗化呈连续的波浪状。

(2) TB18 钛合金棒材具有较好的时效强化效果,经固溶时效处理能够提高强度 $400\sim 500\text{ MPa}$ 。缓慢冷却后形成的晶界 α 相对合金塑性、韧性不利。随着冷却速度的减慢,合金塑性和韧性均降低,尤其是断裂韧性降低明显,由空冷后的 $86.9\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 降低到 $0.25\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 缓慢冷却条件下的 $57.8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,表明合金断裂韧性对晶界 α 相具有较高的敏感性。

(3) 采用 BASCA 热处理工艺能够使 TB18 钛合金获得在抗拉强度接近 1300 MPa 的水平下,延伸率达到 8% ,断裂韧性超过 $80\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的优异综合性能。

参考文献 References

- [1] Li C M, Huang L, Zhao M J, et al. Hot deformation behavior and mechanism of a new metastable β titanium alloy Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al in single phase region[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 814: 141231.
- [2] Ye C, Zhang P, Mo D H, et al. Dynamic response and microstructure evolution of titanium alloy plates under low-velocity impact [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 180: 109888.
- [3] Wu C, Huang L. Hot deformation and dynamic recrystallization of a near-beta titanium alloy in the β single phase region[J]. Vacuum, 2018, 156: 384-401.
- [4] 李少强, 弓站朋, 李辉, 等. TB18 钛合金热变形行为及动态再结晶机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(9): 3045-3051.
- [5] 王新南, 费跃, 刘洲, 等. 航空用新型低成本钛合金显微组织与损伤容限性能关系研究[J]. 钛工业进展, 2013, 30(2):7-10.
- [6] 党薇, 薛祥义, 李金山, 等. TC21 合金片层组织特征对其断裂韧性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 16-20.
- [7] Campanelli L C, da Silva P S C P, Jorge Jr A M, et al. High cycle fatigue and fracture behavior of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr alloy with BASCA and double aging treatments[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 658: 203-209.
- [8] Guo W, Spatschek R, Steinbach I. An analytical study of the static state of multi-junctions in a multi-phase field model[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2011, 240(4/5): 382-388.
- [9] Mao Y Z, Li J G, Li C, et al. Formation and expansion behavior of necklace structure in Al-10Mg alloy during hot uniaxial compression[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(9): 2729-2736.
- [10] Liu C M, Lu Y, Tian X J, et al. Influence of continuous grain boundary α on ductility of laser melting deposited titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 661: 145-151.
- [11] Fan J K, Li J S, Kou H C, et al. Influence of solution treatment on microstructure and mechanical properties of a near b titanium alloy Ti-7333[J]. Materials & Design, 2015, 83: 499-507.
- [12] Lütjering G, Albrecht J, Sauer C, et al. The influence of soft, precipitate-free zones at grain boundaries in Ti and Al alloys on their fatigue and fracture behavior[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 468-470: 201-209.
- [13] 付艳艳, 宋月清, 惠松晓, 等. β 钛合金的强韧化机制分析[J]. 稀有金属, 2009, 33(1): 92-95.