

多重热处理对 TC4 合金的组织 and 力学性能的影响

马英杰 刘建荣 雷家峰 杨锐

(中国科学院金属研究所钛合金研究部 沈阳 110016)

摘要 研究了多重热处理对 TC4 钛合金的显微组织和力学性能的影响. 多重热处理温度中第一重处理位于单相区, 第二重位于两相区, 前两重热处理均采用不同的冷却速率, 最后进行时效处理. 结果表明: 采用不同多重热处理制度可以调节材料的显微组织参数, 包括片状 α 的长度、宽度、长宽比以及次生 α 片层的数量等, 从而可以优化材料力学性能的搭配, 特别是显著提高片层组织的塑性. 采用适当的多重热处理不仅提高了材料的强度和塑性, 而且使材料的断裂韧性有一定程度的提高.

关键词 金属材料, 钛合金, 多重热处理, 显微组织, 双片层组织, 力学性能

分类号 TG146

文章编号 1005-3093(2008)05-0555-06

The influence of multi heat-treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy

MA Yingjie LIU Jianrong LEI Jiafeng* YANG Rui

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Manuscript received December 13, 2007; in revised form June 12, 2008.

* To whom Correspondence should be addressed, Tel:(024)23971958, E-mail: jflel@imr.ac.cn

ABSTRACT TC4 lamellar microstructure obtained by multi heat-treatment and mechanical properties of lamellar microstructure were discussed in this article. The first and secondary step of multi heat-treatment were executed respectively in single β phase region and $\alpha+\beta$ phase region, both followed by different cooling rates. Tensile properties, fracture toughness and fatigue crack growth rate of samples under different treated conditions were tested. Results show that multi heat-treatment can modulate morphology of α lamella, including length/thickness ratio of primary α lamella and the quantity of secondary α lamella. Mechanical experiments results show that certain multi heat-treatment can enhance both tensile properties and fracture toughness property. Bi-lamellar microstructure can improve the resistance to crack propagation due to the influence of fine secondary α lamella.

KEY WORDS metallic materials, titanium alloy, multi heat-treatment, microstructure, bi-lamella, mechanical property

为了获得等轴或双态组织, 通常将钛合金在两相区热处理. 等轴或双态组织使钛合金具有高强度、高塑性以及优异的疲劳强度, 但是抗疲劳裂纹扩展能力以及断裂韧性较低^[1-3]. 随着损伤容限设计思想在钛合金上的应用, 钛合金的抗裂纹扩展性能和断裂韧性受到了越来越高的重视. 采用 β 区固溶而后时效处理可以得到具有原始 β 晶粒的片层组织, 使合金具有优异的抗裂纹扩展性能以及较高的断裂韧性值^[4,5], 抗拉强度略低于等轴或双态组织. 但是这种组织的塑性较差, 在一定程度上限制了 β 区固溶工艺的应用^[6]. 改善热处理工艺掌握控制片层组织参数, 并且

在保障材料具有较高损伤容限性能的前提下提高其塑性, 进而优化片层组织的力学性能, 成为迫切的需要. 本文研究多重热处理对 TC4 钛合金的显微组织和力学性能的影响.

1 实验方法

实验材料为直径 85 mm 的 Ti-6Al-4V 棒材, 其化学成分列于表 1. 先将 Ti-6Al-4V 棒材在 β 相区开坯锻造, 然后在 $\alpha+\beta$ 两相区锻造, 测得相变点温度为 (975 ± 5) °C.

表 1 TC4 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy (mass fraction, %)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.1	4.1	0.04	0.01	0.021	0.01	0.12	Bal.

实验材料的多重热处理均在三段控温管式炉中完成,第一重热处理温度均为 1040 °C, 固溶 1 h 后分别空冷和水冷. 而后在 $\alpha+\beta$ 两相区采用不同温度及不同冷速进行第二重热处理, 其中空冷后得到的片层组织分别进行如下三种热处理: 900 °C/1 h/AC、950 °C/1 h/AC 及 950 °C/1 h/FC, 而水冷后的马氏体组织三种热处理方式分别为: 900 °C/1 h/AC、900 °C/1 h/WQ、950 °C/1 h/FC. 最后在 550 °C 进行 4 h 的时效处理.

拉伸试样工作段的直径为 5 mm, 断裂韧性试样为 $B=35$ mm 的 C(T) 试样, 疲劳裂纹扩展试样采用 $B=12.5$ mm 的紧凑拉伸试样. 在 MTS810 多功能试验机上完成力学性能测试. 用 Axiovert200MAT 光学显微镜观察金相组织, 用透射电镜 PhilipsEM4207 上观察显微组织, 在扫描电镜 JSM-6301F 上完成拉伸试样断口观察.

2 结果与讨论

2.1 多重热处理对合金显微组织的影响

实验材料原始显微组织为等轴组织 (图 1), 试样经第一重热处理, 空冷后得到片层组织 (图 2a), 将其在 $\alpha+\beta$ 两相区经三种热处理后得到图 3 所示的显微组织. 由于第二重热处理在两相区, 一部分 α 相转变为 β 相, 温度越高转变而成的 β 相越多, 在冷却过程中 β 相又转变为次生 α 相. 未转变成 β 相的片层称为初生 α 片层 (图 3b), 初生 α 片层较为粗大, 初生 α 片层之间即为次生 α 相. 在透射电镜下可以更加清晰地观察到细小的次生 α 片 (图 4), 初生 α 片层与次生 α 片层在形态上有较大的差异, 也称为双片层组织. 在 900 °C 进行第二重固溶处理时, 由于只有少量的 β 相生成, 在图 3a 中没有出现明显的次生片层. 比较图 3a 和图 3b 可见, 随着第二重固溶温度的提高, 次生 α 片层的数量增多, 且初生 α 片层的厚度有增大的趋势. 第二重热处理在 950 °C 保温 1 h 炉冷后得到的组织 (图 3c), 具有数量较多呈短粗状的 α 片, 是由两相区保温时形成的 β 相在炉冷过程中转变而成的. 因冷却速度较低生成的片层较厚, 且这些片层只能在初生 α 片层之间生长, 其长度受到初生 α 片层间距的限制, 从而呈短粗状.

水冷后的马氏体组织 (图 2b) 在 $\alpha+\beta$ 两相区经三种热处理后分别得到图 5a、5b 和图 5c 所示的显微组织. 由图 5a 和图 5b 可以看出, 水冷得到的马氏体组织在两相区保温后形成具有异常粗大 α 片的组织, 粗大 α 片厚度大约为 10 μm , 明显大于图 3a 中的 α 片层厚度. 第二重退火两种冷速下均有异常粗大的 α 片生成, 因此粗大 α 片的形成与冷却方式无关. 在 900 °C 保温时并不能形成大量的 β 相, 而

图 5a 和图 5b 中具有数量较多的粗大 α 片层, 因此粗大 α 片层是由马氏体直接分解而成, 并不是由马氏体先转变为 β 相而后再由 β 相转变成 α 相. 马氏体具有密排六方点阵结构, 透射电镜下呈现片状, 并且在一定区域内马氏体片具有相同的柏氏位向关系, 马氏体片之间由位错壁构成^[7]. 马氏体在两相区保温时, α 相会在马氏体相内形核并长大, 当相邻马氏体片具有相同的柏氏位向时, 这些马氏体片便合并生长为粗

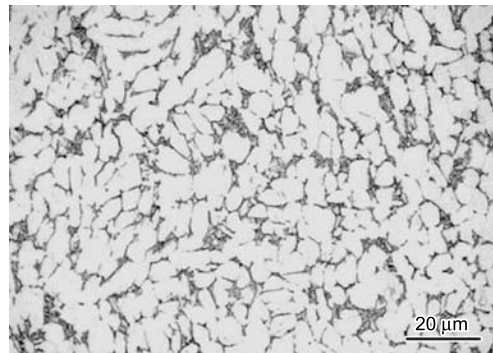


图 1 实验用 TC4 合金的原始显微组织

Fig.1 Original microstructure used in the experiment

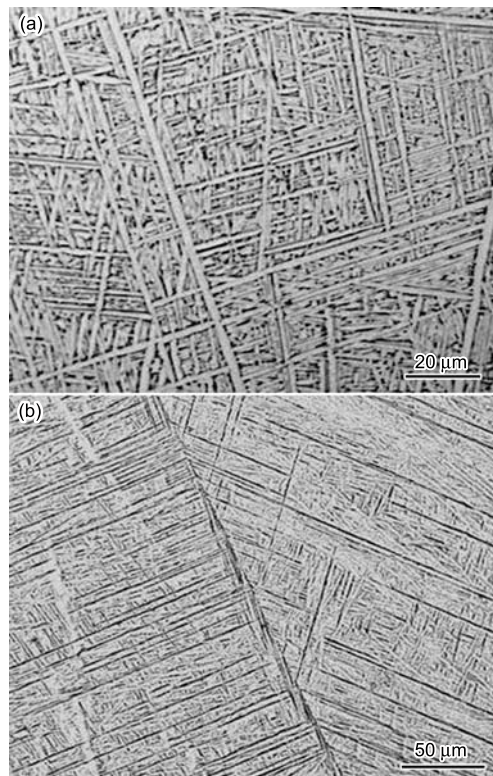


图 2 单相区 1040 °C 固溶 1 h 后采用空冷及水冷得到的显微组织

Fig.2 Microstructures obtained by β heat-treatment at 1040 °C for 1 h, followed by two different cooling rates: (a) lamellar microstructure obtained by air cooling; (b) martensite microstructure obtained by water quenching

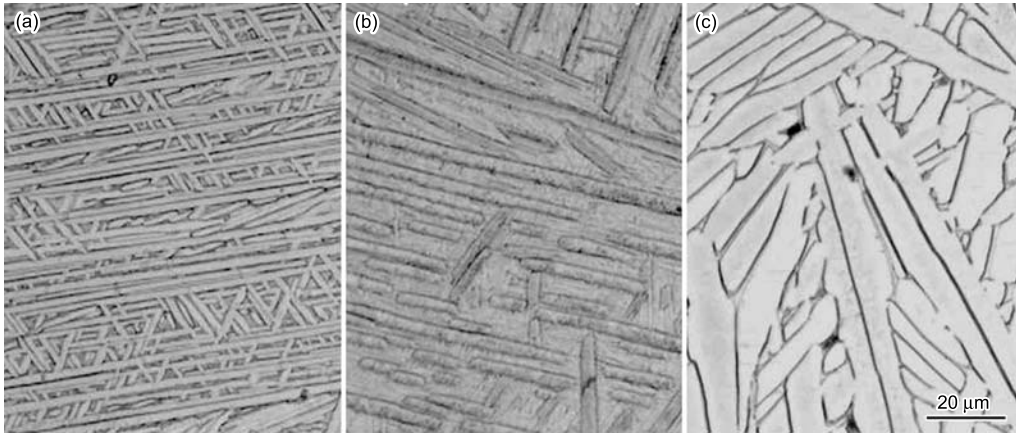


图 3 空冷后得到的片层组织再经过不同的第二重热处理得到的显微组织形态

Fig.3 Microstructures obtained from lamellar microstructure (Fig.2a) after three secondary heat-treatments: (a) 900 °C/1 h/AC; (b) 950 °C/1 h/AC; (c) 950 °C/1 h/FC



图 4 片层组织 (图 2a) 经过两相区 950 °C 第二重热处理后得到的双片层组织

Fig.4 Bi-lamellar microstructure obtained by lamellar microstructure (Fig.2a) after heat-treated at 950 °C

大的 α 片 (图 5a), 马氏体片之间的位错壁则加快了相邻片层之间原子的扩散速度, 粗大 α 片中不连续的黑线则是马氏体片层束合并生长后留下的痕迹. 具有不同柏氏位向的马氏体片则转变为细小的 α 片 (图 5a). 图 5c 中也具有相当数量的短粗状 α 片, 形成机制与图 3c 中短粗 α 片相同, 也是由 β 相缓慢冷却后生成的.

2.2 多重热处理对合金力学性能的影响

2.2.1 多重热处理对拉伸性能的影响 表 2 给出了 6 种热处理制度对应的拉伸性能, HT1 为单一 β 区固溶后时效处理, 其他 5 种制度均为包括两相区热处理的多重热处理制度. 与单一 β 区固溶加时效处理 HT1 比较, HT2 和 HT3 都不同程度地提高了材料的拉伸性能, 尤其是 HT2 显著提高了合金的屈服强度和塑性, 抗拉强度也得到提高; HT4 和 HT6 获得的组织强度降低, 但塑性却得到了极大提高, 其中 HT4

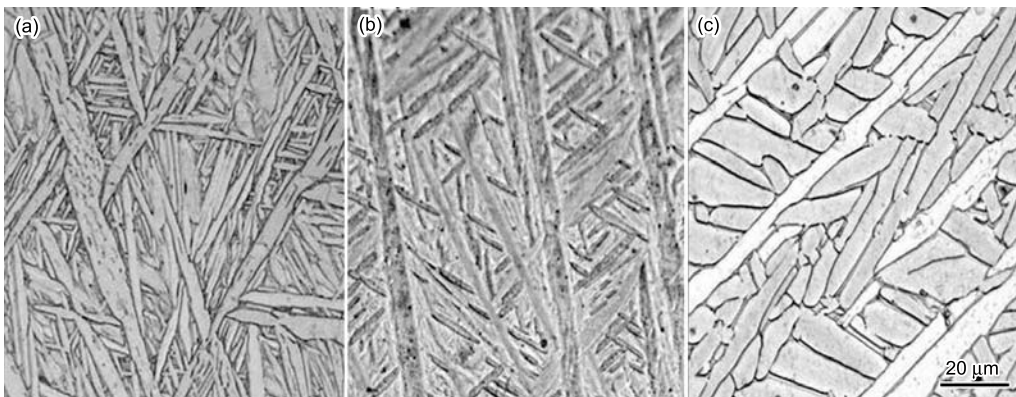


图 5 将马氏体组织 (图 2b) 经过不同的第二重热处理得到的显微组织形态

Fig.5 Microstructures obtained from martensite structure (Fig.2b) after three secondary heat-treatments: (a) 900 °C/1 h/AC; (b) 900 °C/1 h/WQ; (c) 950 °C/1 h/FC

表 2 不同多重热处理制度下材料的拉伸性能以及断裂韧性

Table 2 Tensile and fracture toughness properties under different multi-treatments

No.	Heat-treatment	UTS /MPa	0.2%YS /MPa	El /%	RA /%	K_q /MPa·m ^{1/2}
HT1	1040 °C/1 h/A.C. +550 °C/4 h/A.C.	976	887	8.8	11	92
HT2	1040 °C/1 h/A.C.+900 °C/1 h/A.C. +550 °C/4 h/A.C.	984	923	10.4	18	95
HT3	1040 °C/1 h/A.C.+950 °C/1h/A.C. +550 °C/4h/A.C.	974	903	9.6	15	—
HT4	1040 °C/1 h/A.C.+950 °C/1 h/F.C. +550 °C/4 h/A.C.	910	840	13	23	102
HT5	1040 °C/1 h/W.Q.+900 °C/1 h/A.C. +550 °C/4h/A.C.	1015	940	8.2	14.5	94
HT6	1040 °C/1 h/W.Q.+950 °C/1 h/F.C. +550 °C/4 h/A.C.	942	866	11.8	16.8	—

的延伸率比 HT1 提高 47%，面缩率提高一倍；HT5 则在保持塑性基本不变的情况下抗拉强度提高了 40 MPa，屈服强度提高了 53MPa。可以看出，用多重热处理能优化片层组织的拉伸性能，不仅全面提高拉伸性能 (HT2、HT3)，还能显著提高材料的某一种性能 (HT4、HT5、TH6)。

HT2 和 HT3 同时提高了材料的强度和塑性，是初生 α 片层之间细小的次生 α 片的作用。在 β 相中析出的细小次生 α 片不仅强化了 β 相，使其强度提高，而且细化了整体组织从而提高了材料的塑性 [8]。HT4 和 HT6 制度使塑性显著提高则是由于在高温两相区保温后炉冷形成的短粗状 α 片使组织得到一定程度的等轴化，使得变形协调能力增强。

2.2.2 多重热处理拉伸试样断口分析 HT2 热处理后试样拉伸断口既有粗糙断面，也有较为平整的断面，其中平整断裂面为沿晶断裂所致，而粗糙断裂面为穿晶断裂产生 (图 6)；在沿晶断裂的平整断面发现了大量的微剪切滑移带 (图 7)。TC4 时效后存在沉淀硬化，而晶界上存在无沉淀区，因此在变形过程中容易出现沿晶界的滑移，产生微剪切滑移带。几乎在所有的平整断裂面上都发现了微剪切滑移带，滑移达到一定的应变后便产生断裂，因此在两条微剪切滑移带之间能看到微小的断裂韧窝。微剪切滑移带具有不同的方向是各晶粒之间相互作用而不断改变滑移方向造成的。沿晶断面上的细小韧窝，是韧性断裂的典型特征，因此这种断裂方式可称为沿晶韧性断裂 [9]。

在穿晶断裂处观察到典型韧性断裂的韧窝 (图 8)，这是塑性空洞长大造成的；同时也观察到空洞遗留下来的痕迹 (图 9)，空洞是第二相颗粒或夹杂物产

生的。当材料发生塑性变形时，第二相颗粒或夹杂物从基体上分离，引起空洞的产生并长大，最终空洞联在一起导致断裂 [10]。

2.2.3 多重热处理对断裂韧性和疲劳裂纹扩展速率的影响 热处理制度 HT1、HT2、HT4、HT5 下

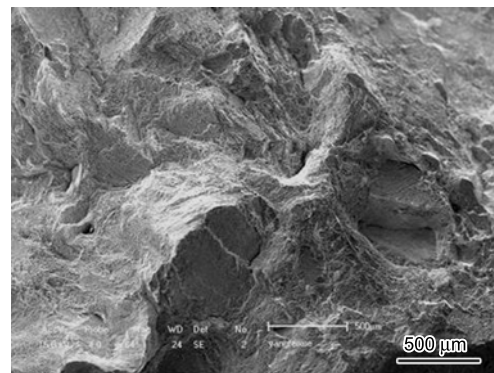


图 6 HT2 制度下材料宏观拉伸断口的形貌

Fig.6 Microscopic fractographs of tensile fracture surface of HT2

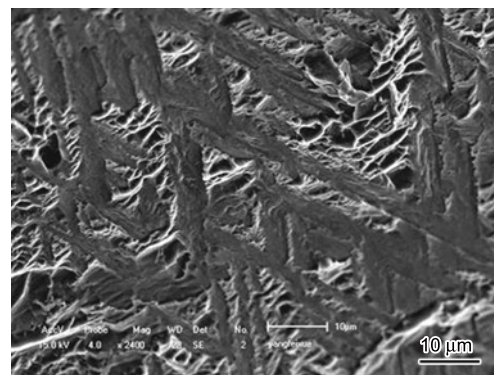


图 7 沿晶断裂中的微剪切滑移带

Fig.7 Micro-shear slip band in intercrystalline fracture

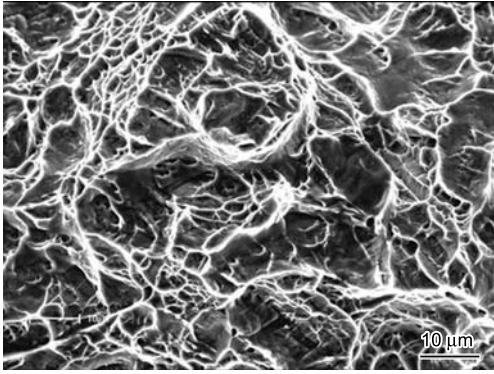


图 8 穿晶断裂处的韧窝显示韧性断裂

Fig.8 Dimple in transcrystalline fracture surface shows ductile rupture

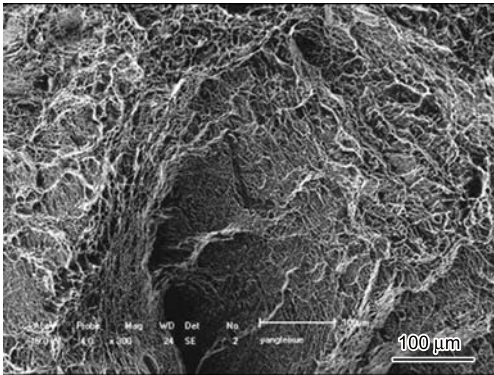


图 9 空洞的生长能够导致韧性断裂

Fig.9 Cavity in ductile rupture which can lead to rupture

断裂韧性值的测试结果列于表 2. 由于试样厚度的限制, 所测结果均为 K_q 值. 相对于单一 β 区固溶加时效处理制度 HT1, 多重热处理制度 HT2 稍微提高断裂韧性值, HT4 和 HT5 则较大提高了断裂韧性值, 但是拉伸强度有所降低. 由此可见, 多重热处理可以在一定范围内调节材料的断裂韧性, 从而为人们选择合适的热处理工艺提供了方法. HT2 所得组织断裂韧性实验过程中拉伸断裂阶段稳态扩展时的断口形貌, 为穿晶断裂 (图 10a) 和沿晶断裂 (图 10b) 的混合断口.

实验对双片层组织的裂纹扩展速率进行了测试, 并与普通片层组织做了对比 (图 11), 采用多重热处理制度 $1000\text{ }^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC}+960\text{ }^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC}+550\text{ }^\circ\text{C}/4\text{ h}/\text{AC}$ 获得双片层组织. 由图 11 可以看出, 当 $\Delta K \leq 11.8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时, 双片层组织的抗裂纹扩展能力高于普通片层组织. 这是由于双片层组织中细小的次生 α 片层降低了疲劳裂纹扩展时的有效滑移距离 [8], 使裂纹扩展路径在小范围内发生改变, 扩展路径发生曲折, 从而降低了裂纹扩展速率. 当疲劳裂纹在一个周次的扩展距离增大到一定程度后, 次

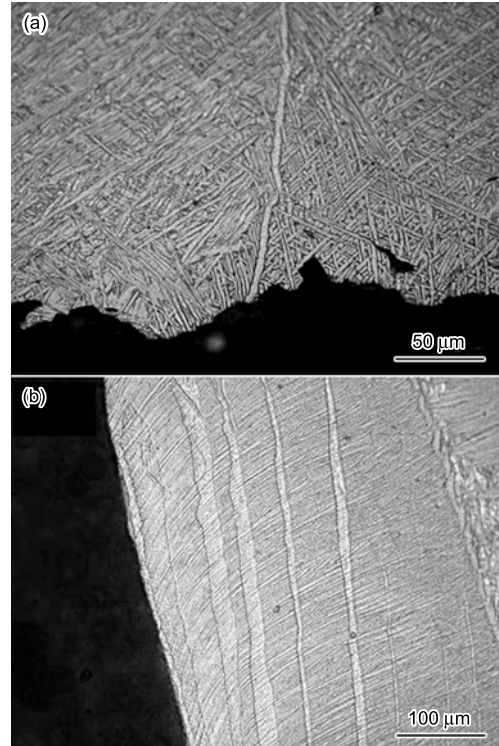


图 10 HT2 制度下材料断裂韧性实验中的两种断裂方式

Fig.10 Transcrystalline fracture (a) and intercrystalline fracture (b) in fracture toughness test of HT2

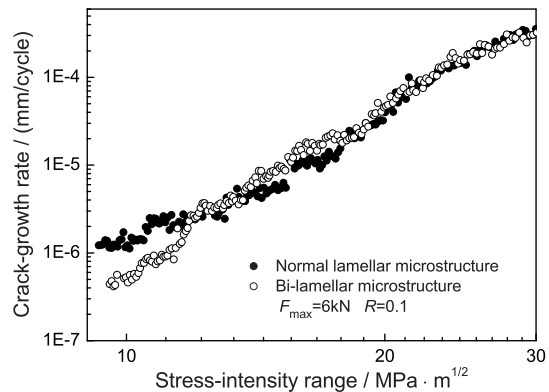


图 11 具有双片层组织和普通片层组织的材料疲劳裂纹的扩展速率

Fig.11 Fatigue crack growth rates of specimens with bi-lamellar and normal lamellar microstructure

生 α 片层便起不到阻碍的作用, 因此裂纹扩展速率达到一定范围后双片层组织和一般片层组织的裂纹扩展速率基本相同.

3 结 论

1. 控制多重热处理中第一重热处理的冷却速率和第二重热处理的温度及冷却速率, 可以有效调节片

层组织的尺寸参数;在两相区保温时,马氏体组织在一定区域内具有相同的柏氏位向关系,且马氏体中的位错壁加快了扩散速度,使马氏体分解形成具有粗大 α 片层的组织.

2. 多重热处理可以调节材料的力学性能搭配,适当的多重热处理可以细化显微组织,显著提高片层组织的塑性值;在较低的裂纹扩展速率阶段,双片层组织中细小的次生 α 片层降低了疲劳裂纹扩展时的有效滑移距离,使双片层组织具有较低的疲劳裂纹扩展速率.

参 考 文 献

- 1 Shikai Li, Baiqing Xiong, Songxiao Hui, Wenjun Ye, Yang Yu, Comparison of the fatigue and fracture of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V with lamellar and bimodal microstructures, *Materials Science and Engineering A*, **460-461**, 140(2007)
- 2 G.Lujerring, Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha+\beta$) titanium alloys, *Materials Science & Engineering A*, **A243**, 32(1998)
- 3 R.Filip, K.Kubiak, W.Ziaja, J.Sieniawski, The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, **133**, 84(2003)
- 4 G.Lujerring, Property optimization through microstructural control in titanium and aluminum alloys, *Materials Science and Engineering*, **A263**, 117(1999)
- 5 Zhang W F, Cao Ch X, Li X W, Ma J M, Zhu Zh Sh, Effect of β heat-treatment on mechanical property of TA15 titanium alloy, *Rare Metal Materials and Engineering*, **33**, 769(2004)
- 6 C.Leyens, M.Peters, *Titanium and Titanium Alloys* (Beijing, Chemical Industry Press, 2005) p.15
(C.莱茵斯, M.皮特尔斯, 钛与钛合金 (北京, 化学工业出版社, 2005) p.15)
- 7 WANG Jinyou, *Aerial Titanium Alloy* (Shanghai, Shanghai Science and Technology Press, 1985) p.137, 153
(王金友, 航空用钛合金 (上海, 上海科学与技术出版社, 1985) p.137, 153)
- 8 G.Schroeder, J.Albrecht, G.Luetjering, Fatigue crack propagation in titanium alloys with lamellar and bilamellar microstructures, *Materials Science and Engineering A*, **A319**, 602(2001)
- 9 H.Migl., *Plastic Deformation and Fracture in Material* (Beijing, Science Press, 1998) p.12
(H.米格兰比, 材料的塑性变形与断裂 (北京, 科学出版社, 1998) p.12)
- 10 SHU Delin, *Mechanical Property in Metal* (Beijing, China Machine Press, 1999) p.29
(束德林, 金属力学性能 (北京, 机械工业出版社, 1999) p.29)