

TC21 钛合金微观组织对准静态和动态压缩性能的影响

杨红斌, 李萌蘖, 卜恒勇

(昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

摘 要: TC21 钛合金经不同工艺热处理后, 获得了等轴组织、双态组织和片层组织, 通过万能材料试验机及分离式 Hopkinson 压杆, 分别对 3 种组织试样进行压缩试验, 研究微观组织对 TC21 钛合金准静态和动态压缩性能的影响。结果表明, 三者的准静态压缩性能各不相同, 等轴组织塑性最好, 但其强度低; 双态组织强度较高, 断裂应变却较差; 片层组织具有较好的强塑性匹配。三者的动态压缩性能也存在差异, 在 $1500 \sim 3200 \text{ s}^{-1}$ 应变率压缩下, 等轴组织的动态流变应力较低, 但其动态塑性应变较好, 具有较好的抗冲击性能; 双态组织有着较高的流变应力, 但其抗冲击性能较差; 片层组织表现出较高的流变应力同时抗冲击性能好, 为三者中动态力学性能匹配最佳。

关键词: TC21 钛合金; 微观组织; 准静态和动态; 压缩性能

中图分类号: TB301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)02-0183-04

Effects of Microstructure on the Quasi-Static and Dynamic Compression Properties of TC21 Titanium Alloy

YANG Hongbin, LI Mengnie, BU Hengyong

(Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Three different microstructures of TC21 titanium alloys, including equiaxed, binary and lamellar microstructure, were obtained after different heat-treatments. The effects of microstructure on the quasi-static and dynamic compression properties were studied and analyzed by using compression tests. The results showed that, different microstructure presented different quasi-static and dynamic compression performances. The equiaxed microstructure had a higher plasticity, but lower strength. Binary microstructure had a better strength, but poor plasticity. Lamellar microstructure had a relatively better plasticity and strength. At the strain rate about $1500 \sim 3200 \text{ s}^{-1}$, the equiaxed microstructure had a lower flow stress, but higher dynamic plastic strain and impact resistance. Binary microstructure had a higher flow stress, but poor impact resistance. Lamellar microstructure showed higher flow stress and impact resistance, which indicated the lamellar microstructure had a better comprehensive performance in the three kinds of microstructure.

Key words: TC21 titanium alloy; microstructure; quasi-static and dynamic; compression properties

1 前 言

由于国内航空系统对钛合金损伤容限设计的需求^[1], 我国自主研发了高强韧损伤容限型 TC21 钛合金, 其名义成分为 $\text{Ti-6Al-3Mo-2Nb-2Sn-2Zr-1Cr}$ ^[2], 是目前我国综合力学性能匹配较好的钛合金材料^[3, 4]。该合金在实际的应用过程中, 不可避免会遇到强冲击作用而

发生高速变形, 然而钛合金在高速冲击载荷作用下表现出的动态力学性能与静载荷作用下的不同^[5-8]。为加快 TC21 钛合金的工程应用, 研究其在不同加载条件下的力学性能十分必要。另外, 对于不同组织状态的钛合金材料, 性能存在很大的差异^[9-11]。为此, 本文针对 3 种组织状态的 TC21 钛合金, 研究微观组织对准静态和动态压缩性能的影响, 为该合金的实际应用提供一定的参考。

2 实 验

2.1 实验材料

试验用 TC21 钛合金为 $\Phi 13.8 \text{ mm}$ 的棒材, 微观形貌为典型的等轴组织, 化学成分如表 1 所示, β 转变温度

收稿日期: 2018-05-07 修回日期: 2018-06-12

基金项目: 云南省省级人培项目(KKSY2016S1030)

第一作者: 杨红斌, 男, 1989 年生, 博士研究生

通讯作者: 卜恒勇, 男, 1983 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: buhengyong@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.02.15

为(960±5)℃。为获得双态组织和片层组织,采用的热处理工艺分别为:910℃/1h,AC+570℃/4h,AC和972℃/1h,WQ+890℃/1h,AC+590℃/4h,AC。

2.2 压缩试验方法

准静态压缩试验在万能材料试验机上进行,应变速率为0.001s⁻¹,试样尺寸为Φ7mm×10mm。动态压缩试验采用分离式Hopkinson压杆技术,其试验装置及原理参见文献[12]和[13],采用200mm撞击杆,冲击气压分别为0.05,0.06,0.08和0.10MPa,名义应变速率约为1500,2000,2500和3200s⁻¹,试样尺寸为Φ4mm×4mm,压缩试验均在室温下进行。

表 1 TC21 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC21 titanium alloy (ω/%)

Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Nb	Si	C	H	O	N	Ti
6.0	1.96	2.41	2.51	1.60	1.83	0.12	<0.005	0.001	0.075	0.010	Bal.

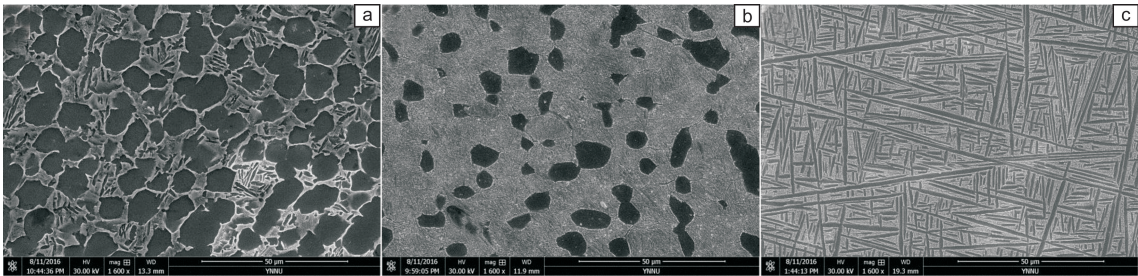


图 1 不同工艺热处理后获得的 TC21 钛合金组织:(a)等轴组织,(b)双态组织,(c)片层组织

Fig.1 Microstructures of TC21 titanium alloys obtained after different heat-treatments:(a) equiaxed,(b) binary and (c) lamellar

3.2 准静态压缩性能分析

TC21 钛合金等轴、双态和片层组织试样对应的准静态压缩真应力-应变曲线如图 2 所示。从图中可以看出,3 种组织试样在压缩变形初期,应力随着应变的增加呈线性增大,此时处于弹性变形阶段。弹性阶段过后,所有曲线中均未出现明显的屈服点。采用 0.2% 塑性应变对应的应力($\sigma_{0.2}$)作为屈服应力,得到 3 种组织试样的屈服应力分别为 922, 965 和 942 MPa。在塑性变形阶段,三者的应变硬化均较弱,其中等轴组织具有最好的塑性,断裂应变达到 0.323,但其断裂强度最低,约为 1284 MPa;双态组织断裂强度较高,达到了 1374 MPa,此时断裂应变为 0.238;片层组织的断裂强度约为 1357 MPa,明显高于等轴组织,与双态组织相当,同时具有较好的塑性,断裂应变约为 0.266。因此,片层组织具有较好的强塑性匹配。

对于两相钛合金来说^[14],等轴组织具有较好的塑性,这是由于等轴 α 相有利于材料的塑性变形,而且 α 晶粒分布越均匀,相互协调性越好。双态组织中, β 基

3 结果与讨论

3.1 微观组织分析

通过不同的热处理工艺处理后,获得等轴组织、双态组织和片层组织的 TC21 钛合金试样,具体组织形貌分别如图 1 所示。图 1a 中,组织由大量的等轴状 α 相和少量 β 转变组织构成,等轴 α 颗粒之间排列紧密,尺寸相对较大,为典型的等轴组织。图 1b 为双态组织,组织中含有少量的等轴 α 相,尺寸较小, β 基体上分布有大量的细小针状 α 相,并交错排列。图 1c 为片层组织形貌,组织中存在尺寸较大的 α 片,各片丛内 α 条交错编织。

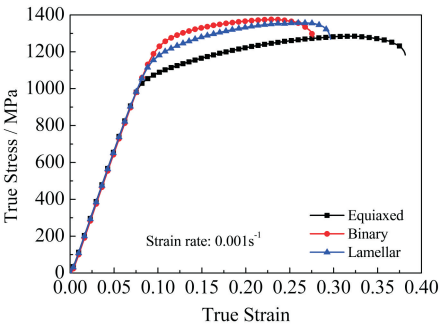


图 2 TC21 钛合金 3 种组织试样的准静态压缩真应力-应变曲线

Fig.2 Quasi-static compression true stress-strain curves of the three kinds of microstructure of TC21 titanium alloy

体中分布的细小次生 α 条对塑性变形非常不利,使其强度较高,塑性较差。在片层组织中,尺寸较大的 α 片的存在,使其在一定的变形范围内具有很好的协调性,但在 α 片交界处变形不易进行,从而具有较高的强度。因此片层组织具有相对较好的塑性,同时还能具有较高的强度。

3.3 动态压缩性能分析

等轴、双态和片层组织的 TC21 钛合金试样在不同应变率压缩下的动态真应力-应变曲线如图 3 所示。

可以看出, 3 种组织试样在 1500 s^{-1} 应变率压缩下, 曲线均未出现突然卸载, 因此试样均没有发生破坏; 随着应变率提高到 2000 s^{-1} 时, 等轴组织试样对应的应力-应变曲线为正常卸载, 其余两种组织试样为突然卸载; 当应变率再增加, 达到 2500 和 3200 s^{-1} 时, 曲线均出现

突然卸载, 3 种试样均发生了破坏。由此可见, TC21 钛合金的组织中, 抗冲击性能最好的是等轴组织, 最差的是双态组织, 片层组织居于前两者之间。在高应变率下, 等轴组织的动态流变应力相对较低, 但其具有较好的动态塑性应变; 双态组织虽然表现出较高的流变应力, 但其失效前的塑性应变较差; 片层组织不仅表现出较高的流变应力同时还具有较大的断裂应变, 为三者中强塑性匹配最佳。

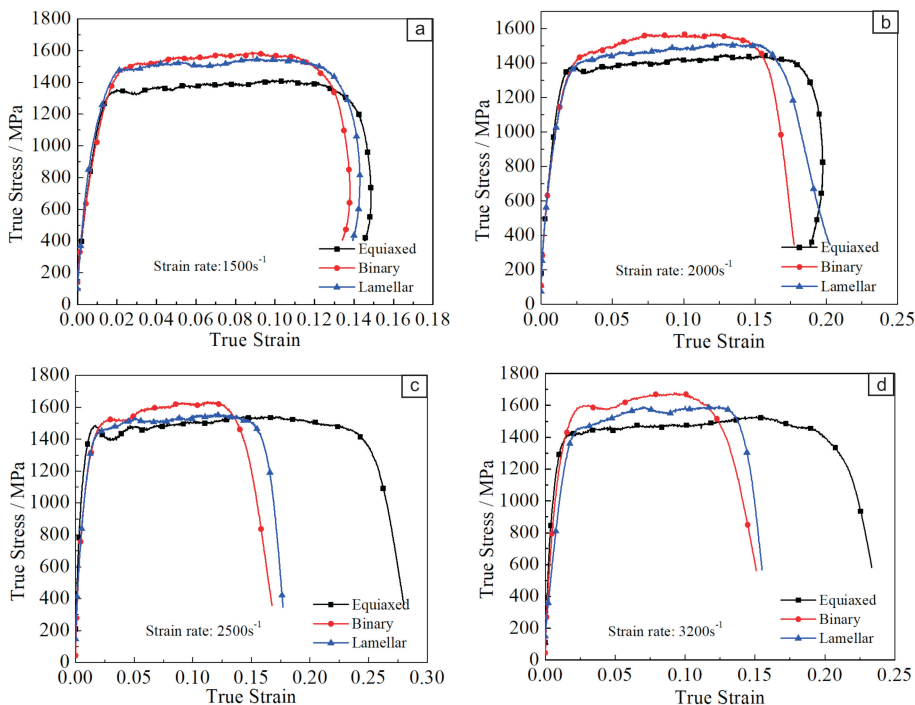


图3 TC21 钛合金 3 种组织试样的动态压缩真应力-应变曲线

Fig. 3 Dynamic compression true stress-strain curves of the three kinds of microstructure of TC21 titanium alloy

已有的研究表明, 等轴 α 相具有抵抗裂纹萌生的能力, 对钛合金的塑性和冲击性能有利; 片状 β 转变组织则可以有效地抵抗裂纹的扩展^[15, 16]。因此, 在本研究中, 等轴组织表现出较低的流变应力和较大的断裂应变, 抗冲击性能较好; 双态组织与等轴组织正好相反; 片层组织同时表现出较大的断裂应变和较高的流变应力。

4 结 论

(1) 通过不同工艺的热处理, 能够获得等轴、双态和片层组织状态的 TC21 钛合金。

(2) 3 种组织的试样的准静态压缩性能各不相同; 等轴组织的塑性最好, 但其强度低; 双态组织强度较高, 而塑性较差; 三者中片层组织具有较好的强塑性匹配。

(3) 在 $1500\sim 3200\text{ s}^{-1}$ 应变率压缩下, 等轴组织的动态流变应力较低, 但塑性应变较好, 具有较好抗冲击性能, 而双态组织正好相反, 片层组织则表现出强塑性最

佳匹配的优异综合性能。

参考文献 References

- [1] Cao Chunxiao (曹春晓). *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报) [J], 2002, 38(s1): 4-11.
- [2] Zhao Yongqing (赵永庆), Qu Henglei (曲恒磊), Feng Liang (冯亮), et al. *Titanium Industry Progress* (钛工业进展) [J], 2004, 21(1): 22-24.
- [3] Zhu Zhishou (朱知寿), Wang Xinnan (王新南), Tong Lu (童路), et al. *Materials China* (中国材料进展) [J], 2010, 29(5): 14-17.
- [4] Dai Jun (戴俊), Li Xin (李鑫), Lu Shiqiang (鲁世强), et al. *Journal of Netshape Forming Engineering* (精密成形工程) [J], 2014, 6(6): 116-121.
- [5] Zhan H Y, Wang G, Kent D, et al. *Materials Science & Engineering A* [J], 2014, 612: 71-79.
- [6] Zhang Changqing (张长清), Xie Lansheng (谢兰生), Chen Minghe (陈明和), et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色

金属学报)[J], 2015, 25(2): 323-329.

[7] Li Mingbing(李明兵), Zhu Zhishou(朱知寿), Wang Xinnan(王新南), *et al. Journal of Aeronautical Materials* (航空材料学报)[J], 2016, 36(5): 7-13.

[8] Chen Yang(陈 洋), Pei Chuanhu(裴传虎), Li Zhenxi(李臻熙), *et al. Journal of Aeronautical Materials* (航空材料学报)[J], 2013, 33(6): 8-12.

[9] Liu W Y, Lin Y H, Chen Y H, *et al. Rare Metal Materials & Engineering*[J], 2017, 46(3): 634-439.

[10] Li C, Chen J, Li W, *et al. Journal of Alloys & Compounds* [J], 2015, 627(10): 222-230.

[11] Sun S, Lv W. *Rare Metal Materials & Engineering*[J], 2016, 45(5): 1138-1141.

[12] Li Yulong(李玉龙), Guo Weiguo(郭伟国), Xu Fei(徐 绯), *et al. Explosion and Shock Waves* (爆炸与冲击) [J], 2006, 26(5): 385-394.

[13] Luo Zhiqiang(罗志强), Li Nan(李 南), Li Jikang(李继康), *et al. Physics Examination and Testing*(物理测试)[J], 2017, 35(4): 22-26.

[14] Sun Kun(孙 坤), Cheng Xingwang(程兴旺), Wang Fuchi(王富耻), *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(10): 1856-1860.

[15] Li J, Nan H, Zhao J, *et al. Rare Metal Materials and Engineering* [J], 2013, 42(6): 1105-1107.

[16] Cao Jingxia(曹京霞), Fang Bo(方 波), Huang Xu(黄 旭), *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2004, 28(2): 362-364.

(编辑 惠 琼)