

初生 α 相含量对 TC4 ELI 钛合金动态应力-应变行为的影响

刘清华, 惠松骁, 叶文君, 王 国, 胡光山

(北京有色金属研究总院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

摘 要: 利用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置, 对低间隙 Ti-6Al-4V(TC4 ELI)钛合金中 4 种初生 α 相含量不同的等轴组织在不同应变速率(2 000、3 000 和 4 000 s^{-1})下进行动态压缩试验, 通过动态压缩试验得到材料的动态真应力-应变(σ - ϵ)曲线, 并利用金相显微镜(OM)等对试验后发生剪切失效破坏试样的端面进行观察分析。结果表明: 随着初生 α 相含量的增加, TC4 ELI 的平均动态流变应力、均匀动态塑性应变和冲击吸收功(E)的变化规律不明显, 在 4 000 s^{-1} 应变速率加载条件下, 4 组试样均发生剪切失效破坏, 在失效试样的端面观察到几乎呈同心的圆弧形白亮绝热剪切带(ASB), 部分剪切带发生分叉, 裂纹在剪切带内形核、长大和聚合, 最终导致试样断裂。

关键词: TC4 ELI 钛合金; 初生 α 相; 分离式霍普金森压杆; 绝热剪切带

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

Effect of primary α phase content on dynamic stress-strain behavior of TC4 ELI titanium alloy

LIU Qing-hua, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, WANG Guo, HU Guang-shan

(State Key Laboratory of Nonferrous Metals and Processes,

General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: The dynamic mechanical properties of four equiaxed microstructures with different contents of primary α phase in Ti-6Al-4V extra low interstitial (TC4 ELI) were studied with split Hopkinson pressure bar device. The dynamic stress-strain curves under different conditions were obtained, and the end surfaces of samples lapsed by shear force were examined under a optical microscope. The results show that there exists no regularity on the variation of dynamic strength, dynamic strain and absorbed energy of TC4 ELI alloy with the increasing content of primary α phase. The shear failure damage occurs at the strain rate of 4 000 s^{-1} , the white light adiabatic shear bands (ASBs) of almost concentric are-shaped are observed on the specimen face of four samples. The bifurcation of some adiabatic shear bands occurs. The cracks nucleate, grow and converge in the ASBs, eventually leading to specimen fracture.

Key words: TC4 ELI titanium alloy; primary α phase; split Hopkinson pressure bar; adiabatic shear band

材料在高应变速率下的动态承载能力对其在高速冲击、爆炸、弹塑性应力波等涉及高速变形过程中的应用具有重要的参考价值。材料在涉及冲击载荷的高速变形过程中, 经常出现绝热剪切现象^[1-2], 裂纹在绝热剪切带(ASB)内形核、长大和聚合, 最终导致材料断裂^[3]。

由于 TC4 ELI 钛合金具有较高的塑性、良好的断裂韧性、低的裂纹扩展速率和良好的焊接性能等, 因而被广泛应用于宇航、舰船及低温工程等领域^[4-8]。应用在这些领域的材料, 可能会遇到冲击波的作用, 这就要求材料具有优良的动态承载能力, 使其在较高应变速率下依然保持较好的动态力学性能而不至于发生

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2008BAE62B03); 中国博士后科学基金资助项目(20100470260)

收稿日期: 2012-04-14; 修订日期: 2012-06-07

通信作者: 惠松骁, 教授, 博士; 电话: 010-82241167; E-mail: huisx@grnm.com

断裂。

LEE 等^[9-10]对 Ti-6Al-4V 合金等轴组织和双态组织的动态变形行为和弹道冲击性能进行研究,实验数据表明,双态组织的最大剪应力和剪切破坏时发生的应变均高于等轴组织。胡阳光^[11]利用霍普金森压杆研究了 TC4 钛合金微观组织与绝热剪切敏感性之间的关系,研究表明双态组织的绝热剪切敏感性小于等轴组织,尤振平^[12]通过研究也得到了相同的结论。

等轴组织和双态组织的主要区别是初生 α 相的含量不同。本文作者以 TC4 ELI 钛合金为研究对象,利用霍普金森压杆(SHPB)装置对 4 种初生 α 相含量不同的等轴组织试样进行了动态压缩试验,研究了试样在不同应变速率下的动态真应力—应变(σ — ϵ) 曲线特征,以分析初生 α 相含量对 TC4 ELI 钛合金动态应力—应变行为的影响,为今后 TC4 ELI 钛合金在动态承载条件下的应用提供可靠的实验数据参考。

1 实验

1.1 试验材料

试验材料选用低间隙 Ti-6Al-4V(TC4 ELI)合金,该合金的铸锭经多次锻造、热轧制后获得 d 12 mm 棒材,棒材横截面原始组织为如图 1 所示的等轴组织,该合金的具体化学成分如表 1 所示,利用淬火金相法

测得该合金的相变点为 (945 ± 5) °C。对该合金的棒材分别经过 925、915、905 和 750 °C 加热,保温 1 h,空冷后获得初生 α 相含量($\varphi(\alpha)$, 体积分数)分别为 44%、56%、67%和 84%的等轴组织,这 4 种不同初生 α 相($\varphi(\alpha)$)含量的金相显微组织如图 2 所示。在热处理后的

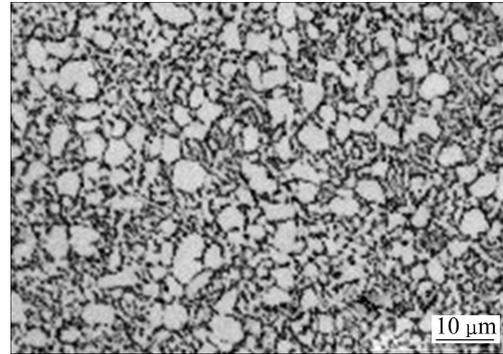


图 1 TC4 ELI 棒材的原始组织

Fig. 1 Original microstructures of TC4 ELI bar

表 1 TC4 ELI 的化学成分

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

Ti	Al	V	Fe
Bal.	5.90	3.89	0.030
C	O	N	H
0.003 9	0.040	0.009 1	0.001 0

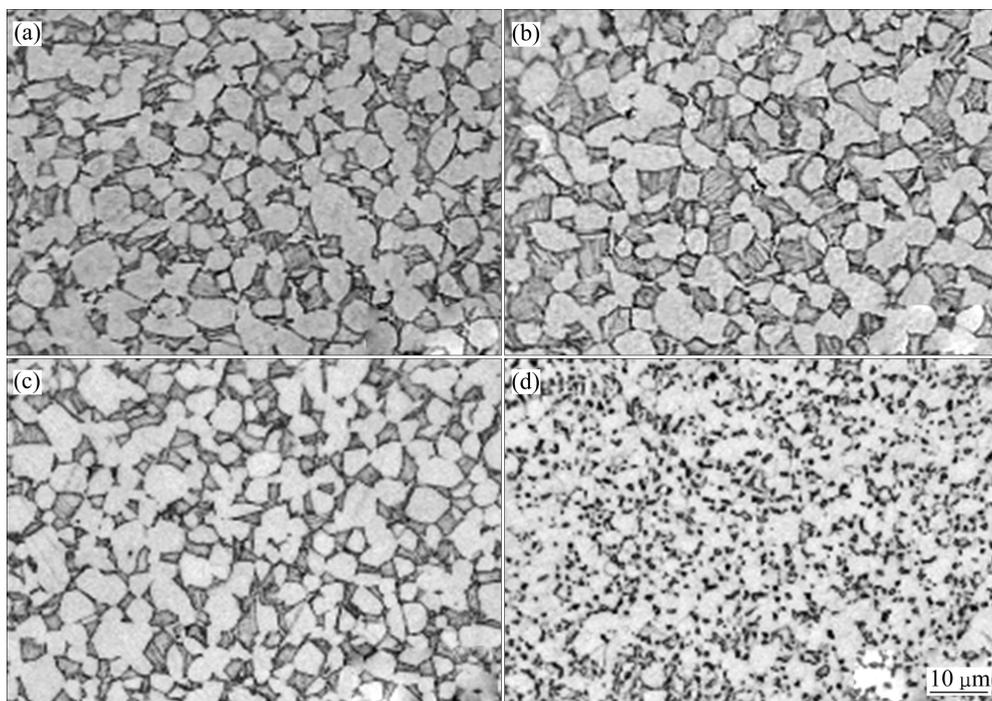


图 2 TC4 ELI 合金的 4 种等轴组织

Fig. 2 Four equiaxed microstructures of TC4 ELI alloy: (a) $\varphi(\alpha)=44\%$; (b) $\varphi(\alpha)=56\%$; (c) $\varphi(\alpha)=67\%$; (d) $\varphi(\alpha)=84\%$

棒材上沿轴向取 $d 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的试样, 然后在霍普金森压杆试验机上进行动态压缩试验。

1.2 试验方法

动态压缩试验在分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson pressure bar, SHPB) 上进行, 试验装置如图 3 所示。

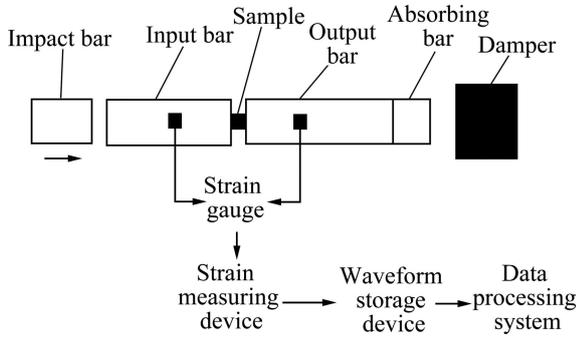


图 3 SHPB 装置示意图
Fig. 3 Scheme of SHPB

SHPB 装置由撞击杆、输入杆、试样、输出杆和测试仪器组成。当枪膛中的撞击杆以一定的速度撞击输入杆时, 在输入杆中产生一个入射脉冲 ε_I , 应力波通过输入杆到达试样, 试样在应力脉冲的作用下产生高速变形, 应力波通过试样, 同时产生反射脉冲 ε_R 进入输入杆和透射脉冲 ε_T 进入输出杆。利用粘贴在输入杆和输出杆上的应变片, 记录入射波、反射波和透射波应变脉冲, 由一维应力波加载原理和应力应变均匀

假定可以确定材料的动态应力应变关系^[13-17]。

入射脉冲 ε_I 、反射脉冲 ε_R 、透射脉冲 ε_T 和应力 (σ)、应变速率 ($\dot{\varepsilon}$)、应变 (ε) 之间的关系如式 (1)、(2) 和 (3) 所示:

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R \tag{2}$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R dt \tag{3}$$

其中: $\varepsilon_R = \varepsilon_I - \varepsilon_T$; E_0 为输入杆的弹性模量; A_0 为输入杆的截面积; A 为试样初始截面积; C_0 为弹性纵波波速; L 为试样初始长度。

将发生剪切失效破坏试样的端面在金相砂纸上逐级打磨, 随后进行电解抛光, 并采用体积比为 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:96$ 的金相腐蚀液进行腐蚀, 然后利用 Axiovert-200MAT 光学显微镜 (OM) 对不同状态下的金相试样进行显微组织观察。

2 结果与分析

2.1 合金的动态应力-应变行为

利用 SHPB 装置对 TC4 ELI 合金 4 种初生 α 相含量不同的等轴组织试样分别在 $2\,000$ 、 $3\,000$ 和 $4\,000 \text{ s}^{-1}$ 应变速率下压缩后, 回收试样的宏观照片如图 4 所示。

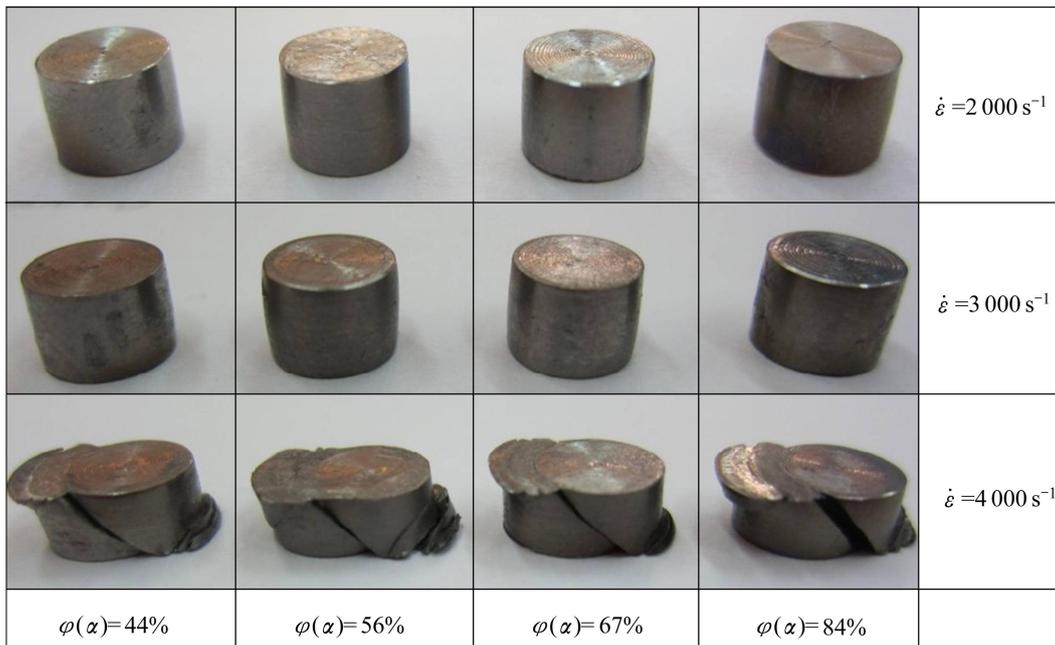


图 4 4 种等轴组织 TC4 ELI 合金试样在不同应变速率下的变形和断裂照片

Fig. 4 Photos showing plastic deformation and fracture of four equiaxed microstructures of TC4 ELI alloy at different strain rates

从图4可看出,在2000、3000 s⁻¹应变速率下变形后,4种等轴组织试样均保持完整,表面没有可见的宏观裂纹,只是随着应变速率的增加冲击变形后的试样高度有所减小。在2000 s⁻¹加载条件下,宏观变形量在10%左右;而3000 s⁻¹加载条件下,宏观变形量在18%左右;当应变速率达到4000 s⁻¹时,宏观变形量达到40%左右,所有试样均发生剪切失效断裂,断裂失效方向沿着最大剪应力方向,即与圆柱试样轴线成45°方向,属于典型的剪切断裂。

4种热处理状态获得的TC4 ELI合金的等轴组织试样在高应变速率下进行动态压缩试验得到的动态真应力—应变(σ — ϵ)曲线如图5所示。由图5可知,动态真应力—应变(σ — ϵ)曲线大致分为弹性阶段和塑性阶段,与静态加载条件下相比,没有出现明显的屈服平台;随着应变速率的增加,4种等轴组织试样的流变应力均有所增加,表现出一定的应变速率强化效应,但随着塑性应变的增加,流变应力没有太明显的变化,这4种等轴组织试样的应变强化效应不明显。

4种等轴组织试样在大致相同的应变速率下的动

态真应力—应变(σ — ϵ)曲线(见图6)对比可知,在2000、3000和4000 s⁻¹应变速率下,初生 α 相含量为44%、67%和84%的等轴组织试样的流变应力差别不大,而初生 α 相含量为56%的等轴组织试样的流变应力最小,在应变速率为4000 s⁻¹时约为1300 MPa,而另外3种等轴组织试样的流变应力在1400 MPa左右。可见流变应力随着初生 α 相含量的增加并不是单调增加的。

本试验使用试样发生塑性变形时所吸收的能量(即冲击吸收功 E)来表征材料的动态应力—应变行为的优劣。图6(c)所示为4种等轴组织试样在4000 s⁻¹应变速率加载条件下的动态真应力—应变曲线,图中应力陡然上升和下降的点分别为试样发生塑性变形和剪切破坏的临界点,对图中的曲线函数求二阶导数,得到拐点 ϵ_1 、 ϵ_2 (图6(c)中所标 ϵ_1 、 ϵ_2 为初生 α 相含量为84%的等轴组织试样所对应的动态真应力—应变曲线的两个拐点),其中 ϵ_1 为试样发生塑性变形的临界点对应的应变值, ϵ_2 为试样发生剪切破坏的临界点对应的应变值。结合图6(c)中的动态真应力—应变曲线数

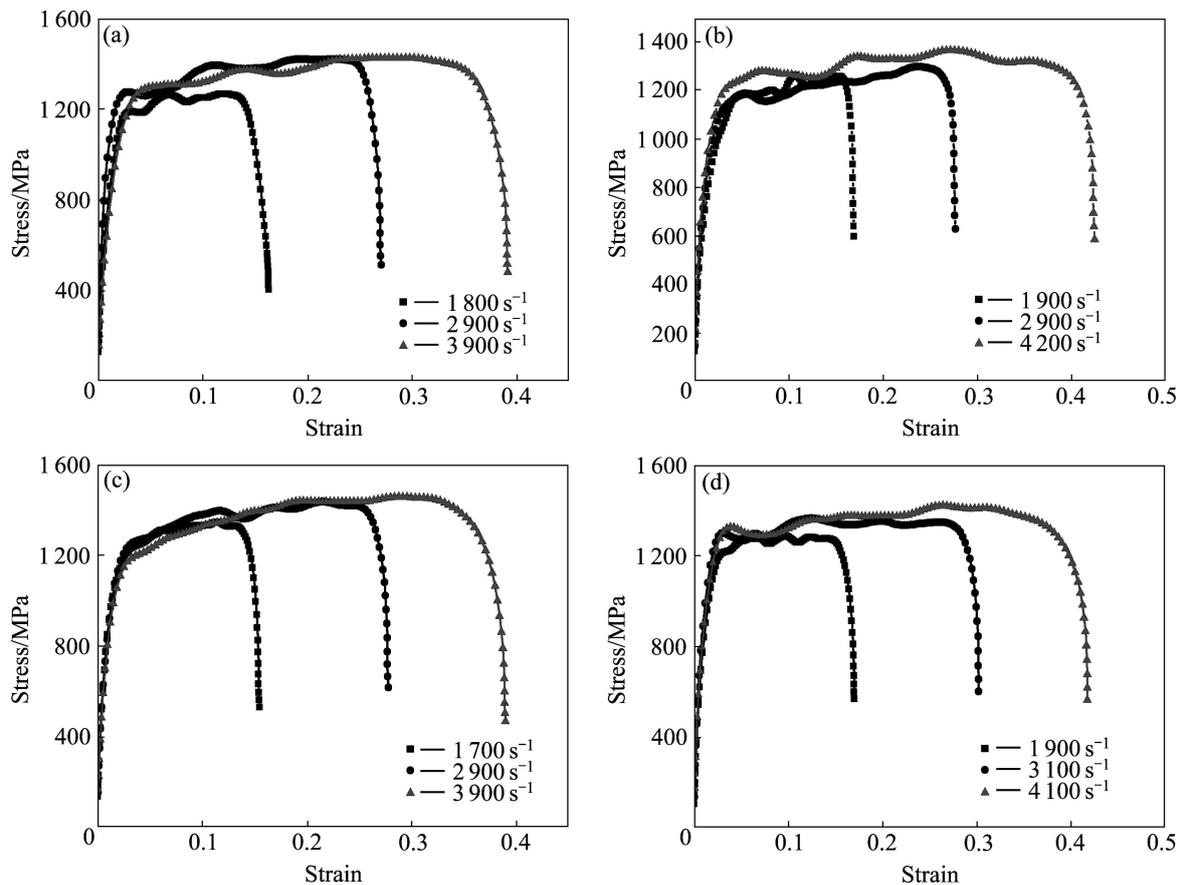


图5 4种等轴组织试样在高应变速率下的动态真应力—应变曲线

Fig. 5 True stress—strain curves of four equiaxed microstructure samples at high strain rates: (a) $\varphi(\alpha)=44\%$; (b) $\varphi(\alpha)=56\%$; (c) $\varphi(\alpha)=67\%$; (d) $\varphi(\alpha)=84\%$

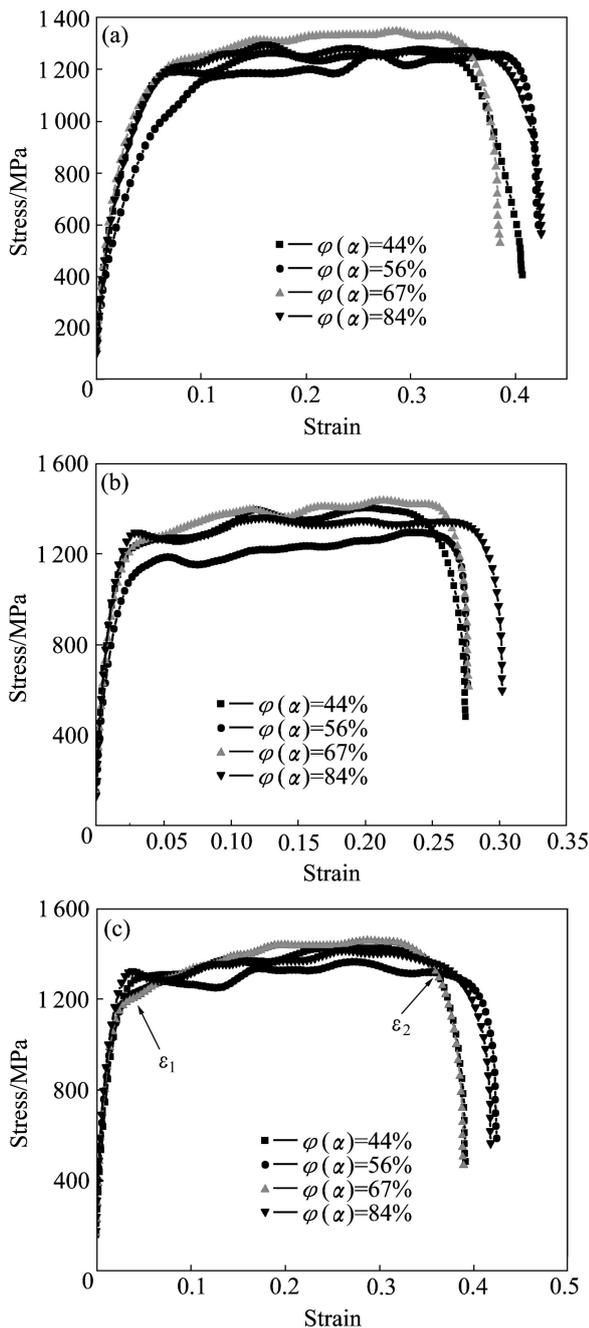


图 6 4 种等轴组织试样在不同应变速率下的真应力—应变曲线

Fig. 6 True stress—strain curves of four equiaxed microstructures at different strain rates: (a) $2\,000\text{ s}^{-1}$; (b) $3\,000\text{ s}^{-1}$; (c) $4\,000\text{ s}^{-1}$

据, 通过式(4)可计算出 4 种等轴组织试样在 $4\,000\text{ s}^{-1}$ 应变速率加载条件下的冲击吸收功 E :

$$E = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

将 4 种等轴组织试样在 $4\,000\text{ s}^{-1}$ 应变速率下的平均动态流变应力(σ)、均匀动态塑性应变(ε)以及冲击吸

收功(E)进行对比, 结果如表 2 所列。

由表 2 可知, 初生 α 相含量为 84% 的等轴组织试样的平均动态流变应力、均匀动态塑性应变和冲击吸收功均最高, 分别为 $1\,400\text{ MPa}$ 、 0.34 和 470 MJ/m^3 。初生 α 相含量为 84% 的等轴组织, 大量的等轴 α 相与基体之间的取向任意, 具有良好的变形协调性, 可以通过自身的大变形有效协调塑性变形过程中的不均匀性, 因而具有较好的动态应力—应变行为。

表 2 在 $4\,000\text{ s}^{-1}$ 下 TC4 ELI 合金 4 种等轴组织试样的 σ 、 ε 及 E 对比

Table 2 Comparison of dynamic strength, dynamic strain and absorbed energy of four equiaxed microstructures of TC4 ELI alloy at $4\,000\text{ s}^{-1}$

$\varphi(\alpha)/\%$	σ/MPa	ε	$E/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$
44	1 360	0.32	440
56	1 290	0.33	430
67	1 370	0.32	430
84	1 400	0.34	470

由表 2 可知, 在应变速率为 $4\,000\text{ s}^{-1}$ 的条件下, 随着初生 α 相含量的增加, 平均动态流变应力和冲击吸收功呈现先降低后增加的趋势, 平均动态流变应力最大值和最小值分别为 $1\,400$ 和 $1\,290\text{ MPa}$, 所对应的初生 α 相含量分别为 84% 和 56%, 两者差值为 110 MPa , 而冲击吸收功的最大值与最小值之间的差值为 40 MJ/m^3 , 虽然有变化但变化趋势不明显, 而均匀动态塑性应变基本上没有变化, 维持在 0.33 附近。以上分析说明评价动态力学性能的 3 个特征参数在初生 α 相含量在 44%~84% 范围内变化时, 对 TC4 ELI 合金等轴组织动态应力—应变行为没有显著影响。

2.2 合金的微观组织

从发生剪切失效破坏试样端面的显微组织(见图 7)中可以观察到弧形的白亮剪切带, 部分剪切带出现分叉现象, 裂纹沿着剪切带扩展。每组试样的剪切带之间间隔着一定的距离, 从弧度上而言, 几乎像是同心的圆弧。

TC4 ELI 为 $\alpha+\beta$ 两相合金, 其中的 α 相和 β 相的变形能力不同, 在发生塑性变形时, 绝热剪切带的形成有差异, 另外, 两相的热传导系数也不同, 使两相的导热能力有差异, 这也是导致绝热剪切带发生分叉的一个原因^[18]。从剪切带的内部可观察到微裂纹, 大部分的微裂纹在剪切带中形成, 这些微裂纹沿着剪切带的扩展方向逐渐长大并聚合在一起, 进而形成宏观

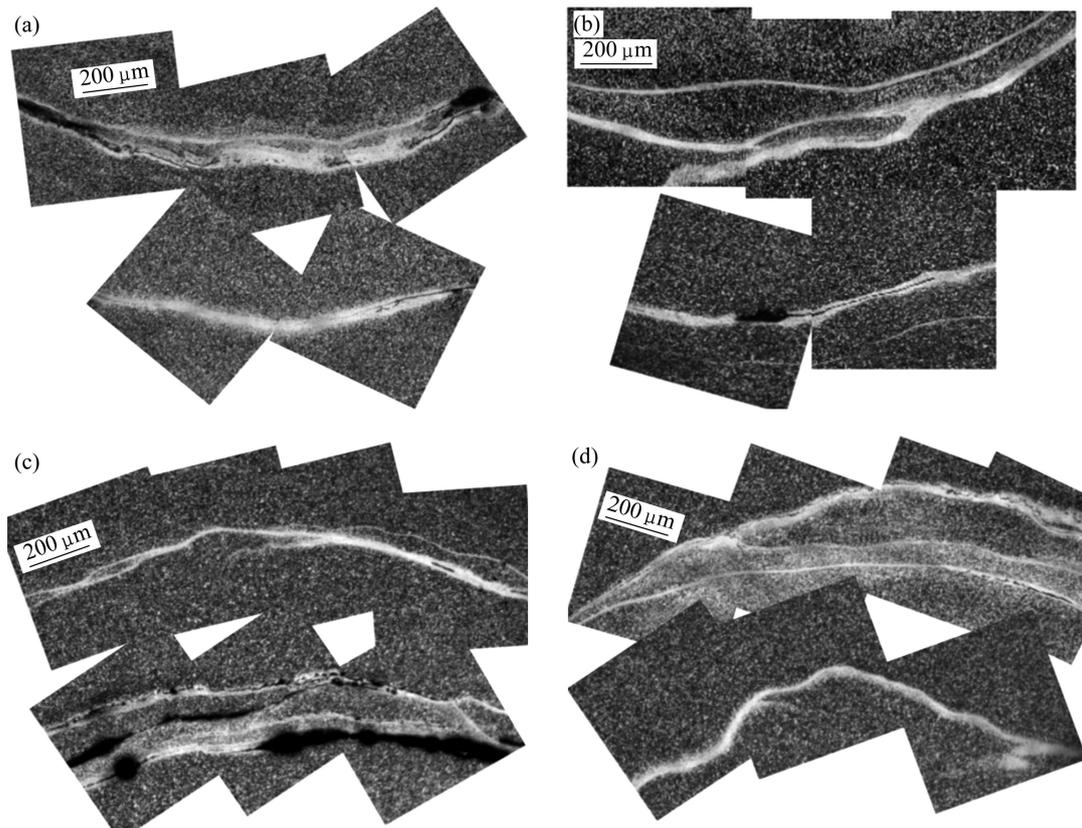


图7 在 4000 s^{-1} 时4种等轴组织试样的剪切带

Fig.7 ASBs of four samples with equiaxed microstructures at 4000 s^{-1} : (a) $\varphi(\alpha)=44\%$; (b) $\varphi(\alpha)=56\%$; (c) $\varphi(\alpha)=67\%$; (d) $\varphi(\alpha)=84\%$

裂纹, 宏观裂纹的扩展使剪切带与基体分离, 导致试样断裂。可见, 导致断裂的裂纹和剪切带有密切关系。

3 结论

1) 在高应变速率下, 4种等轴组织试样表现出一定的应变速率强化效应, 但应变强化效应不明显。

2) 随着初生 α 相含量的增加, TC4 ELI 合金4种等轴组织试样的平均动态流变应力、均匀动态塑性应变和冲击吸收功的变化没有呈现出规律性。初生 α 相含量为84%的等轴组织试样具有较好的动态应力—应变行为。

3) 在剪切失效后试样的端面可观察到多条圆弧形的剪切带, 部分剪切带发生分叉现象, 裂纹在剪切带内形核、长大和聚合, 导致基体和剪切带分离, 使试样断裂。剪切带与导致断裂的裂纹密切相关。

REFERENCES

[1] 孙智, 苏铁健, 李淑华, 王富耻. 高应变速率下工业纯钛 TA2 变形与失效研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(3):

43-47.

SUN Zhi, SU Tie-jian, LI Shu-hua, WANG Fu-chi. Study on deformation and failure of TA2 under compressive load at high strain rate[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(3): 43-47.

[2] 杨扬, 程信林, 安宇龙. TB2 钛合金绝热剪切行为的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 718-724.

YANG yang, CHENG Xin-lin, AN Yu-long. Numerical simulation on adiabatic shearing behavior of TB2[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 718-724.

[3] 刘新芹, 王富耻, 王琳, 路永胜. 钢中绝热剪切带的动态损伤演化[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(3): 17-21.

LIU Xin-qin, WANG Fu-chi, WANG Lin, LU Yong-sheng. Dynamic damage progress of adiabatic shear band of steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(3): 17-21.

[4] 李辉, 曲恒磊, 赵永庆, 冯亮, 叶红川, 周伟. 热处理对 Ti-6Al-4V ELI 合金厚板组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2005, 29(6): 841-844.

LI Hui, QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, FENG Liang, YE Hong-chuan, ZHOU Wei. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI alloy plate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(6): 841-844.

- [5] 王永梅,李渭清,马龙,杨慧丽,王丽瑛,李峰丽. 热处理工艺对 TC4(ELI)钛合金组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(3): 355-357.
WANG Yong-mei, LI Wei-qing, MA Long, YANG Hui-li, WANG Li-ying, LI Feng-li. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 (ELI) titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(3): 355-357.
- [6] 朱知寿,马少俊,王新南,童路,吴学仁,赵永庆,曲恒磊. TC4-DT 损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展特性的研究[J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 10-13.
ZHU Zhi-shou, MA Shao-jun, WANG Xin-nan, TONG Lu, WU Xue-ren, ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei. Study on fatigue crack propagation rate of TC4-DT damage tolerance titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(6): 10-13.
- [7] 李辉,曲恒磊,赵永庆,曾卫东,冯亮,陈军. 显微组织对 Ti-6Al-4V ELI 合金疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(3): 26-29.
LI Hui, QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, ZENG Wei-dong, FENG Liang, CHEN Jun. Effects of microstructure on fatigue crack growth rate of damage tolerance for TC4-DT alloy[J]. Rare Metals Letters, 2006, 25(3): 26-29.
- [8] 李辉,曲恒磊,赵永庆,冯亮,郭红超,周伟. Ti-6Al-4V ELI 合金板材的显微组织与力学性能研究[J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 24-27.
LI Hui, QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, FENG Liang, GUO Hong-chao, ZHOU Wei. Effect of treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI alloy plate[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(6): 24-27.
- [9] LEE D G, LEE Y H, LEE S, LEE C S, HUR S M. Dynamic deformation behavior and ballistic impact properties of Ti-6Al-4V alloy having equiaxed and bimodal microstructures[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35A: 3103-3112.
- [10] LEE D G, YANG G K, NAM D H, HUR S M, LEE S. Dynamic deformation behavior and ballistic performance of Ti-6Al-4V alloy containing fine α_2 (Ti_3Al) precipitates[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 391: 221-234.
- [11] 胡阳光. TC4 钛合金微观组织与绝热剪切敏感性关系研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008: 23-28.
HU Yang-guang. Study on the relation between microstructure and adiabatic shear sensitivity in Ti-6Al-4V[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008: 23-28.
- [12] 尤振平. 钛合金的显微组织与动态性能的关系研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2011: 24-27.
YOU Zhen-ping. Study on the relationship between microstructure and dynamic mechanical property of titanium alloy[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2011: 24-27.
- [13] 刘婷婷,张鹏程,何立峰. U-Ti 合金的动态力学性能[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(12): 1095-1099.
LIU Ting-ting, ZHANG Peng-cheng, HE Li-feng. Dynamic mechanical properties of U-Ti alloy[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(12): 1095-1099.
- [14] 何著,赵寿根,杨嘉陵,程伟. 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢动态力学性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(3): 418-421.
HE Zhu, ZHAO Shou-gen, YANG Jia-ling, CHENG Wei. Experimental investigation of the dynamic material property of stainless steel: 0Cr17Ni4Cu4Nb[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2007, 25(3): 418-421.
- [15] 胡昌明,贺红亮,胡时胜. D6AC 钢的动态力学性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(2): 26-29.
HU Chang-ming, HE Hong-liang, HU Shi-sheng. Research of dynamic mechanical behavior of D6AC steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(2): 26-29.
- [16] 姚俊臣,文丽芳,韩寿波,马岳. 高应变速率下阻尼铝合金的动态力学性能研究[J]. 材料工程, 2006, 6: 46-48.
YAO Jun-chen, WEN Li-fang, HAN Shou-bo, MA Yue. The dynamic mechanical properties of damping aluminum alloys under high strain rate[J]. Materials Engineering, 2006, 6: 46-48.
- [17] 姜凤春,刘瑞堂,张晓欣. 船用 945 钢的动态力学性能研究[J]. 兵工学报, 2000, 21(3): 257-260.
JIANG Feng-chun, LIU Rui-tang, ZHANG Xiao-xin. A study on the dynamic mechanical behaviors of ship-building steel 945[J]. Acta Armamentarh, 2000, 21(3): 257-260.
- [18] 杨扬,程信林,李正华,莫文剑,高文柱,裴大荣. 冶金因素影响绝热剪切带形成的金相观察[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(4): 261-263.
YANG Yang, CHENG Xin-lin, LI Zheng-hua, MO Wen-jian, GAO Wen-zhu, PEI Da-rong. Effects of metallurgical factors on the forming of adiabatic shear band[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(4): 261-263.

(编辑 龙怀中)