

TC6 钛合金 4 种典型组织的动态力学行为研究^{*1}

孙 坤, 徐 媛, 刘晋豪

(楚雄师范学院 物理与电子科学系, 云南 楚雄 675000)

摘要:采用分离式霍普金森压杆技术,研究了 4 种典型组织 TC6 钛合金试样在高应变率加载条件(10^3 s^{-1})下的动态力学行为,并分析了原始组织对动态力学行为的影响.结果表明:在高应变率加载条件下,4 种典型组织 TC6 钛合金的流变应力显示了相同的变化规律:变形初期,应变较小时,流变应力随应变增加快速增加;随后流变应力出现振荡,应力达到峰值后,流变应力随应变的增大而逐渐减小,呈现稳态流变;最后流变应力快速下降;在 10^3 s^{-1} 数量级的高应变率加载条件下,随着应变率的增加,4 种组织的流变应力均呈上升趋势;4 种组织 TC6 钛合金都是应变率敏感材料,但 4 种组织的应变率效应不同;63#网篮组织显示了较高的应变率敏感性,64#固溶时效组织则表现出较低的应变率敏感性,61#等轴组织和 62#双态组织应变率敏感性相当.

关键词:TC6 钛合金;高应变率;动态力学行为;应变率效应

中图分类号:TG 146.4 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-7971(2012)02-0185-06

钛及钛合金由于具有比强度高、耐腐蚀性好、耐高温等优良特性,可进行各种方式的零件成形、焊接和机械加工,被用于制造飞机上各种零部件.目前,先进飞机上的钛材质量达飞机结构总质量的 30%~40%,钛材已成为现代飞机不可缺少的结构材料^[1~4],除航空航天领域外,钛合金在兵器等国防工业领域也有广阔的应用前景^[5~6].鉴于此,研究钛及钛合金的动态力学行为就显得很重要.目前,国内外学者对钛合金动态力学行为及其动态变形过程中微结构演化进行了广泛的研究^[7~13],多集中于单种组织动态力学行为及其变形过程中微结构演化机制研究.本文针对双相型钛合金 TC6,采用分离式 Hopkinson 压杆技术,研究了 TC6 钛合金 4 种典型组织在高应变率加载条件下的动态力学行为及其应变率效应.研究对材料的工程应用选材具有借鉴作用.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及处理方法 实验用 TC6 钛合金

是由宝鸡有色金属加工厂生产的直径为 $\Phi 35$ 的棒材,其成分如表 1 所示.材料分别经 4 种热处理工艺处理,得到 4 种典型组织(表 2 所示),等轴组织主要为等轴状、密排六方结构的初生 α 相晶粒和在晶间分布着体心立方结构的 β 相;双态组织主要为等轴状、密排六方结构的初生 α 相晶粒和晶间分布着体心立方结构的 β 相基体和基体上析出的针状 β 相转变产物 α' (次生 α);网篮组织呈网篮状形貌,主要为层片状、密排六方结构的 α 相晶粒和晶间分布着体心立方结构的 β 相;固溶时效组织主要为等轴状、密排六方结构的 α 相晶粒和针状六方结构的马氏体 α' . 相应组织微结构如图 1 所示.

表 1 TC6 合金的化学成分(w%)

Tab. 1 Chemical constitution of TC6 alloy (w%)

合金	Al	Cr	Mo	Fe	Si	Ti
TC6	6.4	1.48	2.66	0.41	0.28	其余

* 收稿日期:2011-09-29

基金项目:云南省应用基础研究计划项目(2011FZ185);楚雄师范学院院级重点资助项目(10YJZD04);楚雄师范学院学术骨干资助项目(09YJGG02).

作者简介:孙 坤(1971-),男,云南人,博士,副教授,研究方向:钛合金及其动态力学响应. E-mail:sunkun@extc.edu.cn.

表2 TC6 钛合金的热处理方法

Tab.2 Methods of heat treatment of TC6 titanium alloy

编号	处理方法	组织
61#	800℃/2h/AC	等轴组织
62#	900℃/2h/AC + 580℃/5h/AC	双态组织
63#	1040℃/1h/AC	网篮组织
64#	870℃/2h/WQ + 600℃/4h/AC	固溶时效组织

1.2 动态压缩试验 在北京科技大学 MTS 电液伺服材料试验机上进行了压缩试验,测定了 TC6 钛合金 4 种典型组织试样的准静态力学响应,试验条件为:室温(25℃)、应变率 10^{-3} s^{-1} 。在北京理工大学的分离式霍普金森压杆上进行了高应变率加载条件下的动态压缩实验,测定了 TC6 钛合金 4 种典型组织试样的动态力学响应,实验条件为:应变率 $2\,500 \sim 3\,400 \text{ s}^{-1}$ 。

2 实验结果及分析

2.1 高应变率下 TC6 钛合金 4 种典型组织动态

力学行为 图 2a ~ 2d 分别为 TC6 钛合金等轴组织、双态组织、网篮组织及固溶时效组织在不同应变率下的应力-应变曲线。从图可看出,在 10^3 s^{-1} 数量级的高应变率加载条件下,4 种典型组织 TC6 钛合金的流变应力均显示了相同的变化规律:变形初期,应变较小时,流变应力随应变增加快速增加;随后流变应力出现振荡,应力达到峰值后,流变应力随应变的增大而逐渐减小,呈现稳态流变;最后流变应力快速下降。流动应力的这种变化规律与高应变率加载有关,在变形初期,应变硬化、应变率强化占主导地位,这是因为此时变形量较小,由塑性功转化而来的热量尚不足以产生热软化,因而,此时的流变应力呈现快速上升的特征;随应变量的增大,塑性功转化而来的热量也在增加,此阶段,强化与软化相互竞争,共存于变形过程中,因而此时的流变应力呈现出振荡的特征,总体而言,此时的强化与热软化效应相对平衡,材料变形处于稳态流变阶段;流变应力达到峰值后,由塑性功转化而来的热也为最大,热软化效应占据主导地位,因而流变

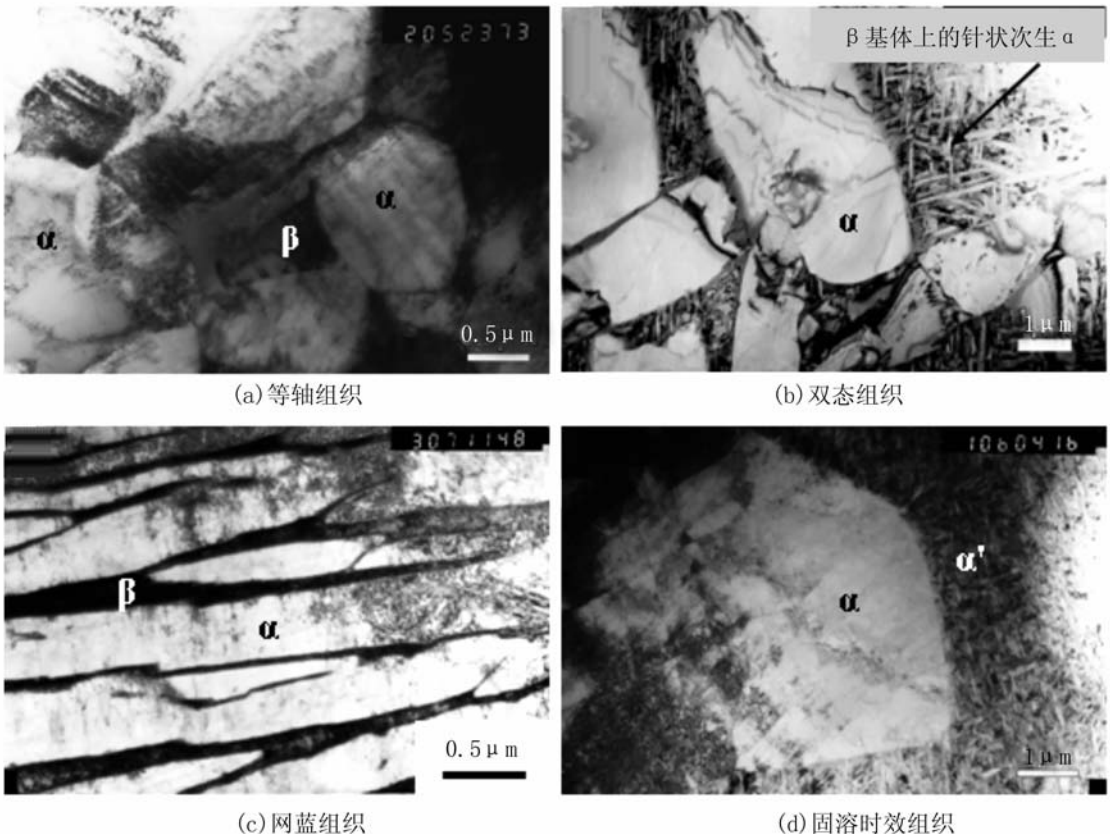


图1 TC6 钛合金 4 种组织的 TEM 形貌

Fig.1 TEM pattern of four kinds of morphology of TC6 titanium alloy

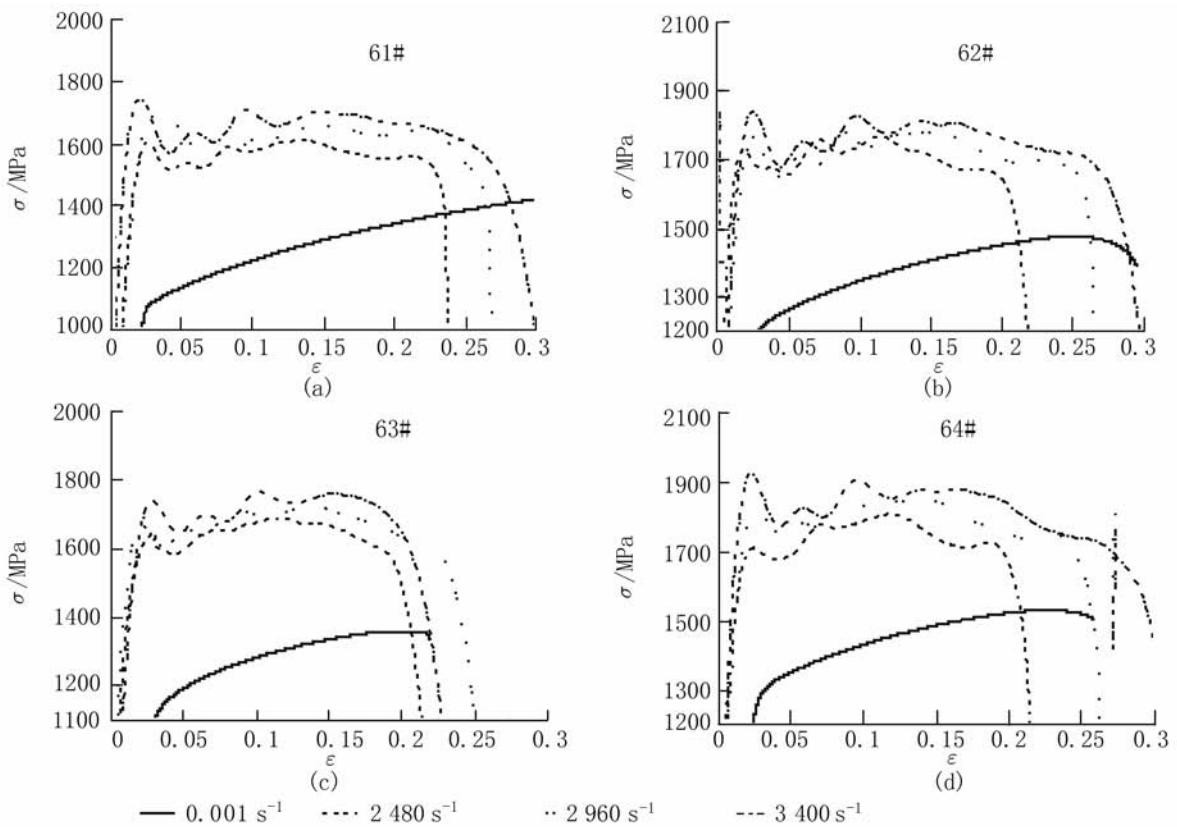


图2 TC6 钛合金 4 种组织分别在 4 种应变率下的应力 - 应变曲线

Fig. 2 Stress - strain curves of four kinds of morphology of TC6 titanium alloy under four kinds of strain - rate

应力逐渐下降;最后流变应力的快速下降是因为沿绝热剪切带产生的裂纹快速扩展导致材料断裂所致. 材料在高应变率下的动态力学响应可用下面的经典公式描述^[14]:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T), \quad (1)$$

$$d\sigma = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{\dot{\varepsilon}, T} d\varepsilon + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon, T} d\dot{\varepsilon} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)_{\varepsilon, \dot{\varepsilon}} dT, \quad (2)$$

$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{\dot{\varepsilon}, T}$: 应变率为常量时的等温应变硬化率;

$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon, T}$: 应变为常量时的等温应变率硬化率;

$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)_{\varepsilon, \dot{\varepsilon}}$: 应变及应变率为常量时的热软化率.

公式(2)右边前两项代表了强化效应,而第3项代表了由于温度升高引起的软化效应.正是这2种效应相互共存于同一过程并相互竞争,导致了材料在高应变率下的流变应力呈现先增加,随后出现振荡,最后趋于下降的特征.

在 10^3 s^{-1} 数量级的高应变率加载条件下,当应变率由 2500 s^{-1} 提高至 3400 s^{-1} 时,随着应变率的

增加,4种组织的流变应力均呈上升趋势.图3显示了TC6钛合金4种组织流变应力随应变率的变化趋势(为方便分析,选取应变0.15时对应的流变应力为例研究,同时,由于应变率分别为 3260 s^{-1} 和 2960 s^{-1} 时,几种组织的应力差别较小,故在图2中未给出应变率为 3260 s^{-1} 时的 $\sigma - \varepsilon$ 图线).可见,TC6钛合金4种组织的流变应力均随应变率增加而增大.一般认为,材料的应变率强化效应与位错运动的热激活有关^[15-16].当应变变量与试验温度一定时,流变应力 σ_i 与应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 遵从如下关系^[17]:

$$\sigma_i = c_1 (\dot{\varepsilon})^m, \quad (3)$$

式中: c_1 在一定应力状态下为常数; m 为应变速率敏感指数.

由公式(3)可见,材料的流变应力与应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 有关,当应变率敏感指数一定时,随应变率增加,材料的流变应力迅速增加.

2.2 显微组织结构对 TC6 钛合金动态力学行为的影响 图4为TC6钛合金4种组织在应变率为 3260 s^{-1} 时的应力 - 应变曲线.图中可看出,在高

应变率加载条件下,61#等轴组织表现出最低的流变应力,但具有最大的断裂应变;62#双态组织表现出较高的流变应力和较大的应变;63#网篮组织具有较低的流变应力及最小的应变;64#固溶时效组织具有最高的流变应力和较大的应变.这些差异显示了显微组织结构对 TC6 钛合金动态力学行为具有较大的影响.研究表明^[18-19],钛合金中,等轴 α 相具有较强的抗裂纹萌生的能力,有利于钛合金塑性和冲击性能的提高,针状 β 转变组织则有利于提高抵抗裂纹扩展的能力,从而提高钛合金的断裂韧性,因为裂纹在片状组织中的运动方向的改变比在球状组织中更频繁,裂纹分叉形成了次生裂纹,这些过程的结果使裂纹的总长度增加,需要对更多的金属体积塑性变形做功,因此组织中增加片状相的体积分数会引起断裂韧性的增加.在本研究中,61#组织为等轴 α 相组织,塑性好,具有最大的断裂应变,又由于其等轴形状,动态变形过程中,变形阻碍较少(晶界少)使其具有最低的流变应力;62#为等轴 α 相及晶间针状 β 转变相的混合组织,兼有较好的塑性及抗裂纹萌生和抵抗裂纹扩展的能力,较多的针状 β 转变相增加了变形阻力(晶界多),故具有较好的塑性及较高流变应力;63#为层片状 β 转变相组成的网篮组织,虽具有较好的抵抗裂纹扩展的能力,但塑性和抗裂纹萌生的能力较差,故流变应力较低,塑性最差;64#固溶时效组织主要为等轴状 α 相晶粒和针状六方结构的马氏体 α' 混合组织,弥散分布的 α' 呈使其具有最高的流变应力,等轴状 α 相则使其具有较大的断裂应变.

2.3 TC6 钛合金 4 种典型组织的应变率效应

由图 2,当应变率由 10^{-3} s^{-1} 量级提高到 10^3 s^{-1} 量级时,TC6 钛合金 4 种组织的流变应力均有大幅提高,说明 4 种组织 TC6 钛合金都是应变率敏感材料.61#等轴组织流变应力从 10^{-3} s^{-1} 量级下的 1288 MPa 增加到 1 594 MPa(应变,应变率分别以 15%、 $2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 为例说明,下同),增幅为 306 MPa;62#双态组织增幅为 320 MPa;63#网篮组织增幅为 334 MPa;64#固溶时效组织增幅为 230 MPa,4 种典型组织在应变率由 10^{-3} s^{-1} 量级提高到 10^3 s^{-1} 量级时流变应力的增幅不同,说明 4 种组织的应变率效应也不同.本文采用了式(4)定义的应变率敏感因子 m ^[20] 对 4 种组织在高应变率加载条件下的应变率效应进行了定量分析:

$$m = \frac{\sigma_D - \sigma_S}{\sigma_S}, \quad (4)$$

式中 σ_D 和 σ_S 分别代表高应变率下的流变应力和准静态下的流变应力.

根据式(4),计算了 TC6 钛合金 4 种组织在应变率 $\dot{\epsilon} \approx 2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 且不同规定应变时的应变率敏感因子,数值如表 3 所示.图 5 为相应 4 种组织应变率敏感因子 m 随应变的变化曲线.

从表 3 及图 5 可看出, $\dot{\epsilon}$ 条件下加载时且在规定的应变下,63#组织均显示了最高的应变率敏感性,64#则表现出了最低的应变率敏感性,61#和62#的应变率敏感性相当.这与 4 种组织在高应变率加载条件下变形时的热软化效应密切相关,由于高应变率加载条件下,材料的变形具有局域化特

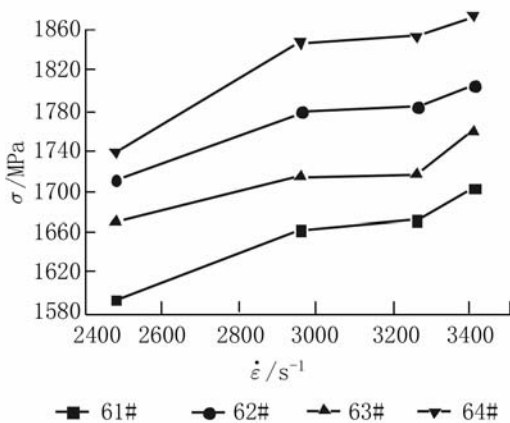


图 3 流变应力随应变率的变化(应变 15%)

Fig. 3 Variation of flow stress with strain - rate (strain: 15%)

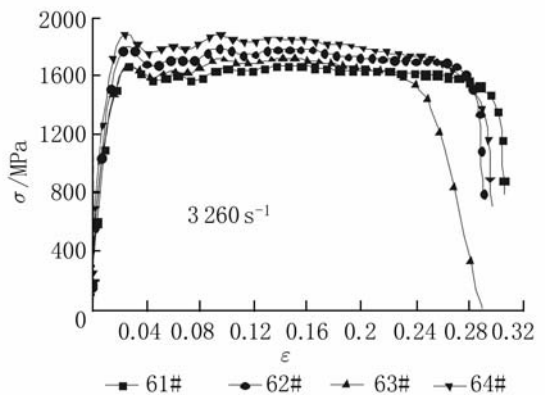


图 4 应变率 3260 s^{-1} 时 TC6 钛合金 4 种组织的应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress - strain curves of four kinds of morphology of TC6 titanium alloy at 3260 s^{-1} in strain - rate

点,塑性功转化而来的热量集中在局域化区域,使此区域温升极高,又由于变形时间极短(微秒量级),使得局域化变形区的热来不及传导出去,因而材料在高应变率加载条件下的局域化变形过程可近似看作绝热过程. 经受大塑性变形的材料局部区域因较高绝热温升而出现热软化,但不同显微组织热软化效应不同,由对 4 种组织高温条件下变形时组织演化与材料强度的分析(另文),63#网篮组织显示了较好的高温强度及较小的热软化效应,因此显示了较高的应变率敏感性,64#固溶时效组织则由于较差的高温强度及较高的热软化效应表现出较低的应变率敏感性. 61#等轴组织和 62#双态组织热软化效应相当,其应变率敏感性也相当.

表 3 TC6 钛合金 4 种组织的应变率敏感因子 m ($\dot{\epsilon} \approx 2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$)

Tab. 3 The strain - rate sensitivity factor of four kinds of morphologies of TC6 ($\dot{\epsilon} \approx 2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$)

应变率	61#	62#	63#	64#
0.075	0.33	0.33	0.37	0.27
0.10	0.29	0.29	0.32	0.25
0.15	0.24	0.22	0.25	0.17
0.20	0.14	0.13	0.21	0.09

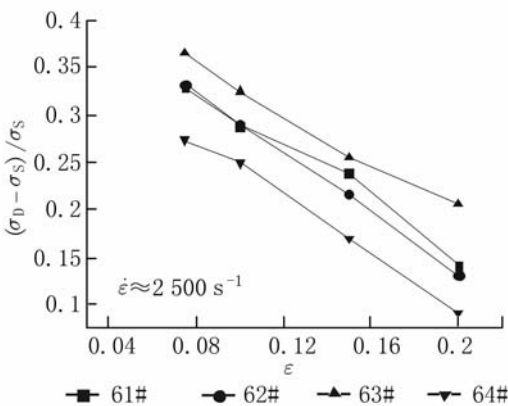


图 5 TC6 合金 4 种组织应变率敏感因子 m 随应变的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of strain - rate sensitivity factor m with strain for four kinds of morphology of TC6 titanium alloy

由图 5 所示,当应变逐渐增大时,4 种组织的应变率敏感因子均呈现下降趋势,这是因为:一方面,高应变率加载条件下,随应变增大,材料中热软

化效应增强,4 种组织的流变应力均有不同程度的小幅下降($\sigma_D \downarrow$);另一方面,在准静态加载条件下,由于热软化效应较小,应变硬化效应占主导地位,随应变增大,流变应力也逐渐增大($\sigma_S \uparrow$),由式(4)可得:

$$m = \frac{\sigma_D}{\sigma_S} - 1, \quad (5)$$

由式(5),对每一种组织,随应变增大, $\sigma_D \downarrow$, $\sigma_S \uparrow$,则必然有 $m \downarrow$.

3 结 论

采用 MTS 电液伺服材料试验机及霍普金森压杆,对 TC6 钛合金圆柱形试样进行了准静态及动态压缩试验,研究了 TC6 钛合金 4 种典型组织的动态力学行为及其应变率效应,结论如下:

(1) 在高应变率加载条件下,TC6 钛合金 4 种典型组织的流变应力显示了相同变化规律. 变形初期,应变较小时,流变应力随应变增加快速增加;随后流变应力出现振荡,应力达到峰值后,流变应力随应变的增大而逐渐减小,呈现稳态流变;最后流变应力快速下降.

(2) 在 10^3 s^{-1} 数量级的高应变率加载条件下,随着应变率的增加,4 种组织的流变应力均呈上升趋势.

(3) TC6 钛合金 4 种组织都是应变率敏感材料,但 4 种组织的应变率效应不同.

(4) 63#网篮组织显示了较高的应变率敏感性,64#固溶时效组织则表现出较低的应变率敏感性,61#等轴组织和 62#双态组织应变率敏感性相当.

参考文献:

- [1] 李兴无,沙爱学,张旺峰,等. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. 钛工业进展, 2003, 20(4): 90-94.
- [2] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(1): 17-21.
- [3] 孙坤,徐媛,自兴发,等. TC6 钛合金高温准静态与室温动态变形条件下微结构演化对比[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(9), 1 561-1 564.
- [4] 孙坤,赵双赞,程兴旺,等. 应变率及 TC6 钛合金的不同组织对其动态力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 14-19.
- [5] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 293-296.
- [6] LEYENS C, PETERS M. Translated by 钛及钛合金 Titanium and Titanium alloy[M]. Beijing: Chemical In-

- dustry Press, 2005.
- [7] 孙坤,程兴旺,王富耻,等. 组织及应变率对 TC6 钛合金绝热剪切敏感性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(10): 1 856-1 860.
- [8] 孙坤,王富耻,程兴旺,等. TC6 钛合金不同组织绝热剪切带的形成机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1), 34-37.
- [9] 孙坤,王富耻,程兴旺,等. TC6 钛合金绝热剪切带不同发展阶段的精细结构[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 233-236.
- [10] WANG Bing-feng, YANG Yang. Dynamic recrystallization in adiabatic shear band in α - titanium [J]. Materials Letters, 2006 (60): 2 198-2 202.
- [11] DEEPAK R Chichili, RAMESH K T, HEMKER Kevin J. Adiabatic shear localization in α - titanium: experiments, modeling and microstructural evolution [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2004, 52: 1 889-1 909.
- [12] LIAO Shih-chieh, DUFFY J. Adiabatic shear bands in a Ti - 6Al - 4V titanium alloy [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(11): 2 201-2 231.
- [13] LEE Woei-shyan, LIN Chi-fneg. Plastic deformation and fracture behaviour of Ti - 6Al - 4V alloy loaded with high strain rate under various temperatures [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 241(1): 48-59.
- [14] BAI Yi-long, DODD B. Adiabatic shear localization [M]. Oxford: Pergamon Press, 1992: 125-144.
- [15] ZUKAS J A, NICHOLAS T. Impact dynamics [M]. USA: John Weley and Sons Ins, 1982.
- [16] WANG Li-li, JIANG Zhao-biao, CHEN Jiang-ying. Studies on rheological relation of materials by taking account of rate dependent evolution of internal defects at high strain rates [C]//WANG Ren. IU TAM Symposium on Rheology of Bodies with Defects. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999: 167-178.
- [17] 王丛曾, 刘会亭. 材料性能学 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [18] 曹京霞, 方波, 黄旭, 等. 微观组织对 TA15 钛合金力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2004, 28(2): 362-364.
- [19] 鲍利索娃 E A. 钛合金金相学 [M]. 陈石卿, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986: 246-261.
- [20] Theodore Nicholas, RAJENDRAN A M. Material characterization at high strain rates [C]//Jonas A Zukas High velocity impact dynamic. Canada: A Wiley - interscience Publication, 1990: 127-280.

Study on dynamic mechanical behavior of four kinds of typical microstructure of TC6 titanium alloy

SUN Kun, XU Yuan, LIU Jin-hao

(Department of Physics and Electron Science, Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000, China)

Abstract: Using the technology of split Hopkinson bar, the dynamic mechanical behavior of four kinds of typical microstructure of TC6 titanium alloy under the condition of high strain - rate loading have been studied and the effects of original microstructure on the dynamic mechanical behavior have been analyzed. It is showed that the stress of the four typical microstructure of TC6 titanium alloy displayed the same variation rule under the condition of high strain - rate loading. At the beginning of deformation, strain is less and stress is quickly increased. The subsequent stress vibrates with increase of the strain. When reached the peak, the flow stress gradually decreases with the increase of the strain and displays a steady - state flow. The final stage of deformation, the flow stress fast fall down. The flow stresses of the four kinds of microstructure of TC6 titanium alloy display the ascending tendency with the increase of the strain - rate under the condition of high strain - rate of 10^3 s^{-1} order. All of four kinds of microstructure of TC6 titanium alloy are sensitive materials to the strain - rate, but their strain - rate effects are different. The TC6 alloy with lamellar microstructure displays higher sensibility to the strain - rate, whereas the TC6 alloy with the solution and aging microstructure displays lower sensibility to the strain - rate. The sensibility of the equiaxed microstructure to the strain - rate is similar to that of the binary microstructure.

Key words: TC6 titanium alloy; high strain - rate; dynamic mechanical behavior; effects of strain - rate