

# 转变 $\beta$ 区体积分数对双态组织 TC4 钛合金动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响规律

彭美旗, 程兴旺, 郑超, 杨凯文, 靳丹

(北京理工大学 冲击环境材料技术重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 研究了固溶温度对双态组织 TC4 钛合金中转变  $\beta$  区体积分数的影响, 并利用分离式霍普金森压杆, 进一步研究了转变  $\beta$  区体积分数对双态组织 TC4 钛合金动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响。结果表明: 随着固溶温度的升高, 转变  $\beta$  区的体积分数随之增加; 在动态压缩实验条件下, 合金的动态抗压强度随着转变  $\beta$  区体积分数的增加, 呈现出先升高后降低的规律, 且在转变  $\beta$  区体积分数为 80.7% 时出现最大值, 而塑性应变则随着转变  $\beta$  区体积分数的增加, 呈现出依次降低的规律; 在强迫剪切实验条件下, 合金的绝热剪切敏感性随着转变  $\beta$  区体积分数的增加, 呈现出先降低后升高的规律, 且在转变  $\beta$  区体积分数为 80.7% 时出现最低值; 且各双态组织 TC4 钛合金均随着撞击杆初速的提高, 其绝热剪切敏感性增加。

**关键词:** 双态组织 TC4 钛合金; 转变  $\beta$  区; 动态压缩性能; 绝热剪切敏感性

**中图分类号:** TG146.2<sup>3</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)08-2227-07

TC4 钛合金是典型的 Ti-Al-V 系双相钛合金, 具有良好的力学性能和工艺性能<sup>[1]</sup>。在航空航天领域, TC4 钛合金已有广泛的应用, 且近些年来, 其在装甲防护领域也得到了应用, 如美国 M1A2 艾布拉姆斯主战坦克、M2 布雷德利装甲运兵车等<sup>[2]</sup>。

TC4 钛合金作为重要的结构件材料, 其服役环境通常在高应变率条件下, 故研究 TC4 钛合金在高应变率加载条件下的动态力学响应一直都是研究的热点。自从 Zener 和 Hollomon<sup>[3]</sup>开创性的工作后, 国内外学者对 TC4 钛合金有了更深入的研究<sup>[4-9]</sup>, 研究发现在高应变率加载条件下, TC4 钛合金对绝热剪切相当敏感, 且发生断裂失效的主要原因是绝热剪切局域化变形的形成, 以及裂纹沿着绝热剪切带的形核和扩展。TC4 钛合金的显微组织对其绝热剪切行为有着显著的影响。Lee 等人<sup>[10]</sup>对等轴组织、双态组织和片层组织 TC4 钛合金的动态扭转性能及其绝热剪切带进行了研究, 研究表明: 在等轴组织中绝热剪切带的数量明显较多, 最易产生绝热剪切带, 而在双态组织中绝热剪切带数量较少, 最不易产生。Zheng 等人<sup>[11]</sup>研究了等轴组织、双态组织和片层组织 TC4 钛合金的动态压缩性能及其绝热剪切敏感性, 得到了相似的结果, 即不同组织 TC4 钛合金绝热剪切敏感性由高到低依次为: 等轴组织、片层组织、双态组织。Liu<sup>[12]</sup>等人则研究了

双态组织、片层组织 TC4 钛合金的动态压缩性能, 结果表明: 双态组织 TC4 钛合金具有更高的动态抗压强度。且在应变率 4000 s<sup>-1</sup> 条件下, 绝热剪切带在双态组织中呈自组织特征, 而在片层组织中自组织特征不明显; 在应变率 6000 s<sup>-1</sup> 条件下, 绝热剪切带在双态组织中仍保持自组织特征, 而在片层组织中产生分支交互呈网状结构。综上可知, 双态组织 TC4 钛合金具有更高的动态抗压强度, 其绝热剪切敏感性最低。众所周知, 对于双态组织 TC4 钛合金来说, 其性能主要取决于微观组织中初生  $\alpha$  相的尺寸大小、转变  $\beta$  区的体积分数, 以及次生片层  $\alpha$  相的宽度等组织细节。然而目前关于双态组织 TC4 钛合金中转变  $\beta$  区体积分数的精细调控及其对组织性能的影响研究还很少见。

本研究通过对 ( $\alpha+\beta$ ) 两相区固溶处理中固溶温度的调控, 获得了具有不同转变  $\beta$  区体积分数的双态组织 TC4 钛合金。并利用分离式霍普金森压杆, 研究了转变  $\beta$  区体积分数对双态组织 TC4 钛合金动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响规律。

## 1 实验

本实验所用原始材料为宝鸡钛业有限公司提供的经过普通热轧退火处理的 TC4 钛合金板材, 其名义成分为 Ti-6.42Al-4.17V-0.19Fe-0.02O-0.01C-0.02N-0.003H

收稿日期: 2016-08-20

作者简介: 彭美旗, 女, 1991 年生, 硕士生, 北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081, 电话: 010-68913951, E-mail: bitpengmeiqi@163.com

(质量分数, %), 由淬火金相法测得其转变  $\beta$  点为:  $(993 \pm 5)$  °C。原始组织主要由等轴或拉长的初生  $\alpha$  相以及晶间  $\beta$  相构成, 如图 1 所示。

采用 SX-G12123 型厢式电阻炉对尺寸为 150 mm×75 mm×25 mm 的 TC4 钛合金原始板材进行 ( $\alpha+\beta$ ) 两相区固溶处理+时效处理。通过对固溶温度进行调控, 即选取固溶温度依次为: 925、975、980、985°C, 均保温 1 h, 随后空冷。再经过时效处理, 即在 550 °C 条件下保温 4 h 后空冷处理, 最终获得了 4 种具有不同转变  $\beta$  区体积分数的双态组织 TC4 钛合金。热处理工艺参数以及不同转变  $\beta$  区体积分数双态组织 TC4 合金的定量分析结果列于表 1。

采用电火花线切割技术切取金相试样。试样经研磨抛光后, 使用 Kroll 腐蚀液 (HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=2:10:88) 腐蚀 6~8 s, 采用 Zeiss Z10 光镜进行观察, 并利用其附带的金相分析软件 Micro-image Analysis & Process 测量组织结构中各相的大小和比例等。

依据国标 GBT228-2002 及 GBT 7314-2005, 沿着板材轧制方向分别切取静态拉伸以及静态压缩试样。室温静态拉伸和压缩实验均在 Instron5985 万能材料试验机上开展, 实验应变率为  $10^{-3} s^{-1}$ 。采用 Hitachi S-4800 型冷场发射扫描电镜对静态拉伸断口进行观察。

利用分离式霍普金森压杆对试样进行动态压缩及强迫剪切实验, 得到不同应变率加载条件下试样的真应力-真应变曲线及电压-时间曲线, 其实验原理及实验装置参阅文献[13]。动态压缩试样为柱形试样, 强迫剪切试样为帽形试样, 其尺寸如图 2 所示。并将实验后的帽形试样进行回收, 将其沿纵截面剖开, 经研磨、抛光、腐蚀后在 Zeiss Z10 光镜下观察其绝热剪切带形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织

通过对固溶温度的调控, 获得了 4 种具有不同转变  $\beta$  区体积分数的双态组织 TC4 钛合金。各组织的金相及其 SEM 图片分别如图 3 和 4 所示, 4 种双态组织

TC4 钛合金均由初生等轴  $\alpha$  相和转变  $\beta$  区组成, 其中转变  $\beta$  区包括残余  $\beta$  相及次生片层  $\alpha$  相。

由图 3、图 4 及表 1 可以看到, 随着固溶温度的增加, 转变  $\beta$  区体积分数呈现出明显增加的规律, 初生等轴  $\alpha$  相体积分数则相应减小, 但其形貌基本保持不变。通过金相分析软件测得, 925#~985#钛合金中

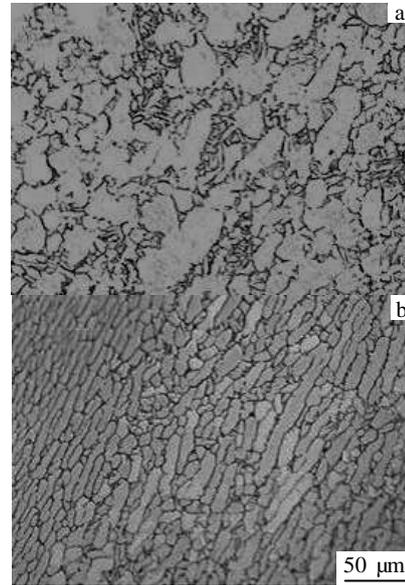


图 1 TC4 合金板材原始组织

Fig.1 Optical microstructures of TC4 alloy plates: (a) thickness direction and (b) rolling direction

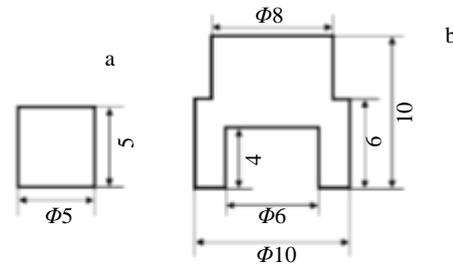


图 2 柱形试样和帽形试样尺寸图

Fig.2 Dimensions of the cylinder shaped (a) and hat shaped (b) specimens

表 1 TC4 合金热处理工艺参数以及不同转变  $\beta$  区体积分数双态组织的定量分析结果

Table 1 Heat-treatment of TC4 alloys and the results of quantitative analysis of the bimodal microstructures with different volume fractions of transformed  $\beta$  matrix

Designation	Solution treatment	Aging treatment	Microstructure	
			Volume fraction of transformed $\beta$ /%	Width of $\alpha_s$ plates/ $\mu$ m
925#	925 °C/1 h, air cooling	550 °C/4 h, air cooling	29.6	1.70
975#	975 °C/1 h, air cooling		70.0	1.74
980#	980 °C/1 h, air cooling		80.7	1.74
985#	985 °C/1 h, air cooling		90.0	1.73

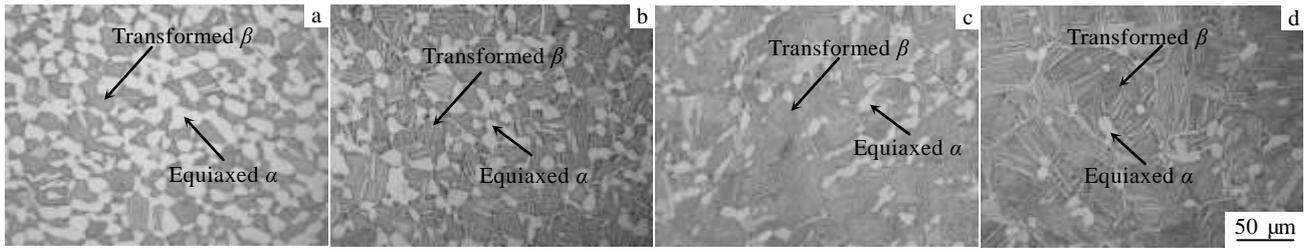
图 3 不同转变 $\beta$ 区体积分数双态组织 TC4 合金微观形貌

Fig.3 Optical micrographs of bimodal microstructures with different volume fractions of transformed  $\beta$  matrix of TC4 alloy: (a) 925#, (b) 975#, (c) 980#, and (d) 985#

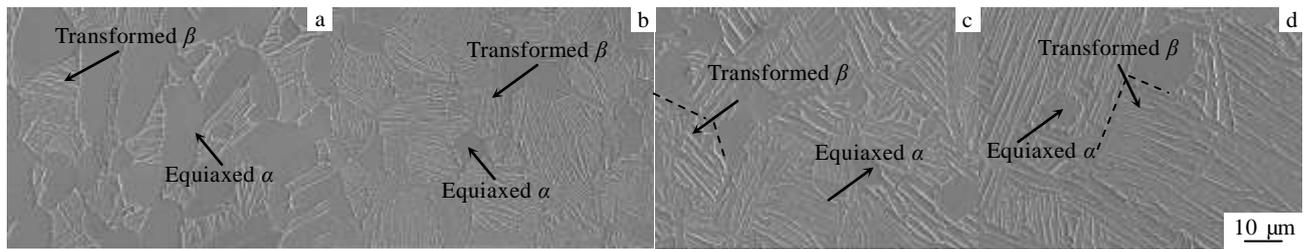
图 4 不同转变 $\beta$ 区体积分数双态组织 TC4 合金 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of bimodal microstructures with different volume fractions of transformed  $\beta$  matrix of TC4 alloy: (a) 925#, (b) 975#, (c) 980#, and (d) 985#

的转变 $\beta$ 区体积分数依次为: 29.6%、70.0%、80.7%、90.0%; 而转变 $\beta$ 区内次生片层 $\alpha$ 相宽度基本保持不变, 均为 $(1.70 \pm 0.05) \mu\text{m}$ 。这是因为在 $(\alpha+\beta)$ 两相区固溶时效过程中, 由于固溶温度并未超过转变 $\beta$ 点, 故只有部分 $\alpha$ 相转变为 $\beta$ 相, 且此时 $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ 的转变是以扩散形式进行的, 即由 $\alpha/\beta$ 界面的迁移导致 $\beta$ 相区的扩大<sup>[14]</sup>, 所以当固溶温度越高时, 其所提供的迁移能越大, 从而提高了 $\alpha/\beta$ 界面的迁移率, 导致 $\beta$ 相区增大, 而初生等轴 $\alpha$ 相含量则相应减小。随后在缓冷过程中, 次生片层 $\alpha$ 相在初生等轴 $\alpha$ 颗粒边界形核, 并向 $\beta$ 相内生长, 最终形成由初生等轴 $\alpha$ 相和转变 $\beta$ 区组成的双态组织。由此可知, 当固溶温度升高但冷却速率一致时, 转变 $\beta$ 区体积分数随之增加, 而次生片层 $\alpha$ 相宽度则基本保持不变。

## 2.2 静态力学性能

针对具有不同转变 $\beta$ 区体积分数的双态组织 TC4 钛合金, 进行了洛氏硬度、室温静态拉伸性能以及室温静态压缩性能测试, 检测结果列于表 2。图 5 则更加直观地反映出转变 $\beta$ 区体积分数对双态组织 TC4 钛合金静态力学性能的影响规律。由图 5 及表 2 可知, 925#~985#钛合金随着转变 $\beta$ 区体积分数的增加, 其洛氏硬度、屈服强度、抗拉强度以及抗压强度均呈现

出先升高后降低的规律, 且在 980#钛合金, 即转变 $\beta$ 区体积分数为 80.7% 时出现最大值。

利用扫描电镜观察静拉伸断口, 图 6 所示为不同放大倍数条件下 4 种双态组织 TC4 钛合金静拉伸断口的扫描图片。由图 6 可以看到, 无论是在低倍数条件下还是在高倍数条件下, 各双态组织 TC4 钛合金的静拉伸断口均呈现出以韧窝为特征的韧性断裂模式。这也与前述拉伸实验结果中断后伸长率及断面收缩率相符合。

## 2.3 动态力学性能

利用分离式霍普金森压杆, 针对具有不同转变 $\beta$ 区体积分数的双态组织 TC4 钛合金, 开展了应变率分别为 2000、2500 和 3000  $\text{s}^{-1}$  的动态压缩性能的测试。4 种双态组织 TC4 钛合金在不同应变率下的真应力-真应变曲线, 如图 7 所示, 且 4 种双态组织 TC4 钛合金在应变率为  $10^{-3} \text{s}^{-1}$  下的真应力-真应变曲线一并列入图中。各应变率下 4 种双态组织 TC4 钛合金的动态抗压强度、塑性应变和冲击吸收功经计算列于表 3。

由图 7a~7c 及表 3 可以看到, 在同一高应变率条件下 925#~985#钛合金随着转变 $\beta$ 区体积分数的增加, 其动态抗压强度呈现出先升高后降低的规律, 且在 980#钛合金, 即转变 $\beta$ 区体积分数为 80.7% 时出现最大值; 塑性应变及冲击吸收功则随着转变 $\beta$

表 2 不同转变  $\beta$  区体积分数双态组织 TC4 合金的静态力学性能

Table 2 Static mechanical properties of bimodal microstructures with different volume fractions of transformed  $\beta$  matrix of TC4 alloy

Designation	Hardness/HRC	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	Z/%	UCS/MPa
925#	30.8	920	973	11.5	31.7	1108
975#	34.5	926	998	13.0	34.3	1206
980#	35.3	934	1011	11.2	29.7	1245
985#	34.5	927	1000	10.3	25.3	1196

Note: UCS—ultimate compressive strength

区体积分数的增加，均呈现出依次降低的规律，且 925# 钛合金具有最好的动态塑性以及最高的冲击吸收功，这是因为其等轴初生  $\alpha$  相体积分数最多，具有更好的塑性变形能力，故而在变形过程中能够吸收更多的能量。

由图 7 还可以看到，当应变率由  $10^{-3} s^{-1}$  提高到  $10^3 s^{-1}$  时，4 种双态组织 TC4 钛合金在同一应变下的动态抗压强度均有大幅度提高，表明各双态组织 TC4 钛合金均是应变率敏感材料；当加载应变率处于  $2000 s^{-1}$  到  $3000 s^{-1}$  这一高应变率范围时，4 种双态组织 TC4 钛合金的抗压强度均未呈现出明显变化，应变率强化效应不明显。

### 2.4 绝热剪切敏感性

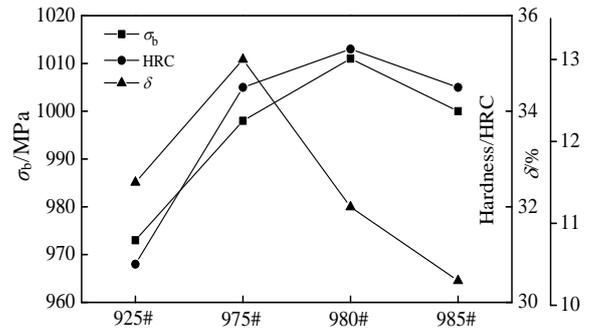


图 5 转变  $\beta$  区体积分数对 TC4 合金静态力学性能影响  
Fig.5 Effects of volume fraction of transformed  $\beta$  matrix on static mechanical properties of TC4 alloy

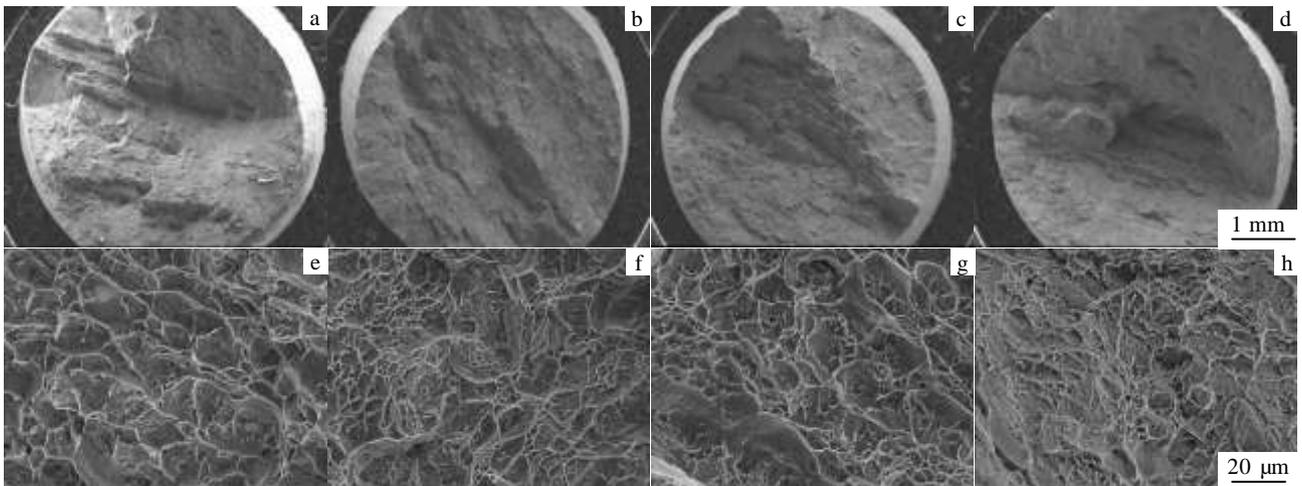


图 6 不同放大倍数条件下 4 种 TC4 合金的静拉伸断口 SEM 照片

Fig.6 SEM fractographs of tensile specimens of TC4 alloy: (a, e) 925#, (b, f) 975#, (c, g) 980#, and (d, h) 985#

TC4 钛合金在高应变率加载条件下，往往会在材料内部形成绝热剪切带，从而诱发微裂纹和微孔洞的产生，最终会因为微裂纹和微孔洞的贯通连接而导致材料产生裂纹甚至断裂，发生剪切失效，从而限制了 TC4 钛合金在装甲防护领域的广泛应用。绝热剪切敏感性则表征了绝热剪切带形成的难易程度。通过强迫剪切实验，可以获得同一撞击杆初速条件下各双态组织 TC4 钛合金的动态剪切电压-时间曲线。该曲线可

反映出材料从动态加载开始直至其发生绝热剪切断裂的承载时间，承载时间越长，表明材料绝热剪切敏感性越低，反之则表明其绝热剪切敏感性越高，因而可用此曲线表征材料的绝热剪切敏感性。

本实验利用分离式霍普金森压杆，针对具有不同转变  $\beta$  区体积分数的双态组织 TC4 钛合金，开展了撞击杆初速分别为 18.3、21.2 和 23.7 m/s 的强迫剪切实验。4 种双态组织 TC4 钛合金在不同撞击杆初速下的电压-时间曲线如图 8 所示。

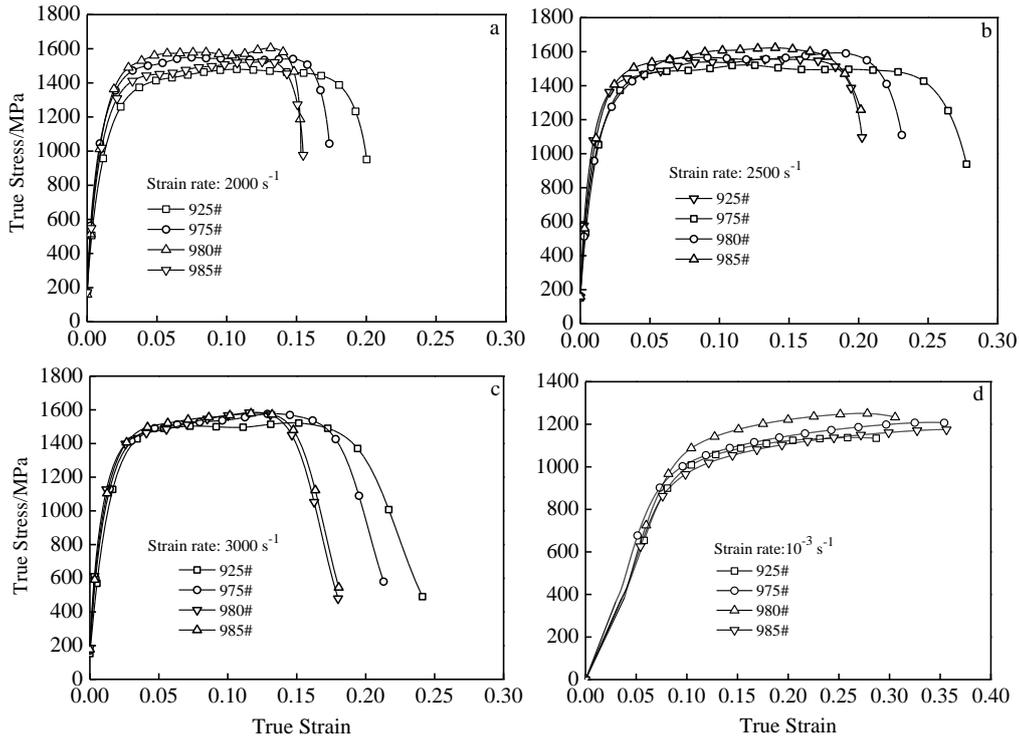


图 7 不同转变  $\beta$  区体积分数双态组织 TC4 合金在同一应变率下的真应力-真应变曲线

Fig.7 Dynamic true stress-true strain curves of TC4 alloy at the same strain rate: (a)  $2000\text{ s}^{-1}$ , (b)  $2500\text{ s}^{-1}$ , (c)  $3000\text{ s}^{-1}$ , and (d)  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$

表 3 不同转变  $\beta$  区体积分数双态组织 TC4 合金的动态压缩性能

Table 3 Dynamic compression properties of bimodal microstructures with different volume fractions of transformed  $\beta$  matrix of TC4 alloy

Designation	Flow strength/MPa			Strain/%			Energy absorbed/MJ $\text{m}^{-3}$		
	$2000\text{ s}^{-1}$	$2500\text{ s}^{-1}$	$3000\text{ s}^{-1}$	$2000\text{ s}^{-1}$	$2500\text{ s}^{-1}$	$3000\text{ s}^{-1}$	$2000\text{ s}^{-1}$	$2500\text{ s}^{-1}$	$3000\text{ s}^{-1}$
925#	1439	1488	1492	18.56	25.41	19.42	254	363	274
975#	1532	1540	1537	16.54	21.00	17.82	241	317	258
980#	1572	1579	1540	14.82	19.01	15.07	219	286	218
985#	1477	1510	1521	14.80	19.00	14.65	207	282	211

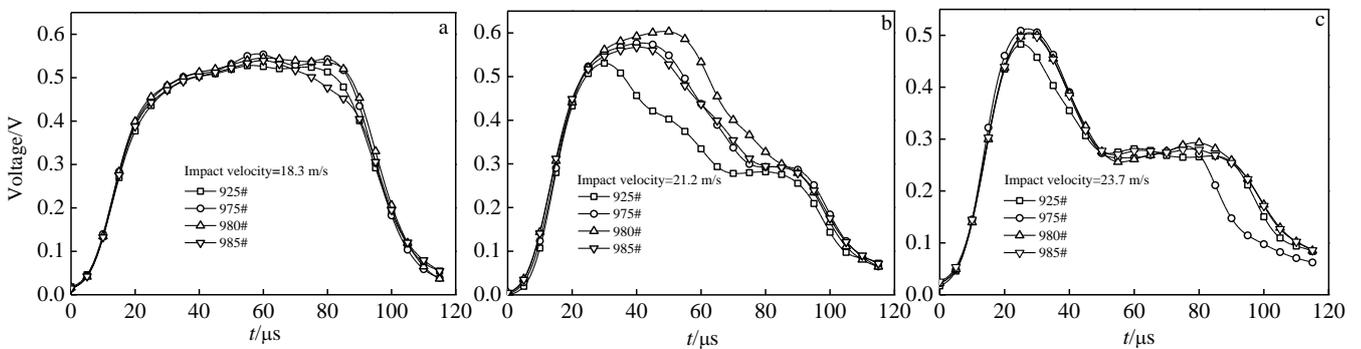


图 8 不同转变  $\beta$  区体积分数双态组织 TC4 合金在同一撞击杆初速下的电压-时间曲线

Fig.8 Dynamic shearing voltage-time curves of TC4 alloy at the same impact velocity: (a)  $18.3\text{ m/s}$ , (b)  $21.2\text{ m/s}$ , and (c)  $23.7\text{ m/s}$

图 9 则更加直观地反映出承载时间随着转变  $\beta$  区体积分数和撞击杆初速的不同所产生的规律性变化。

由图 8 和 9 可以看到, 当撞击杆初速为 18.3 m/s 时, 4 种双态组织 TC4 钛合金的承载时间均约为 80  $\mu$ s 而未发生剪切失效; 当撞击杆初速为 21.2、23.7 m/s 时, 4 种双态组织 TC4 钛合金的承载时间均小于 80  $\mu$ s, 且随着转变  $\beta$  区体积分数的增加, 呈现出先增加后减小的规律, 且在 980# 钛合金, 即转变  $\beta$  区体积分数为 80.7% 时出现最大值。尤以撞击杆初速为 21.2 m/s 时, 这种规律性的变化最为明显。综上可知, 4 种双态组织 TC4 钛合金的绝热剪切敏感性随着转变  $\beta$  区体积分数的增加, 呈现出先降低后增加的规律, 其绝热剪切敏感性由高到低依次为: 925#、985#、975#、980#。

由图 9 还可以看到, 同一双态组织 TC4 钛合金随着撞击杆初速的提高, 其承载时间呈现出依次减小的规律。由此可知, 材料的绝热剪切敏感性随着撞击杆初速的提高而增加。这是因为撞击杆初速的提高, 使得材料获得更多的能量产生变形, 从而导致其局域化变形程度加剧, 更易形成绝热剪切带, 最终导致绝热剪切破坏。

利用光镜观察绝热剪切带的微观组织形貌, 图 10 所示为 4 种双态组织 TC4 钛合金在撞击杆初速 21.2 m/s

m/s 时的绝热剪切带微观形貌。由图 10 可以明显地看到, 在 4 种组织试样中均产生了绝热剪切带, 且绝热剪切带的颜色均呈现出“白亮”特征, 即为“白亮带”, 这就证实了具有不同转变  $\beta$  区体积分数的双态组织 TC4 钛合金材料的失效均是由于绝热剪切带的萌生扩展而导致的。

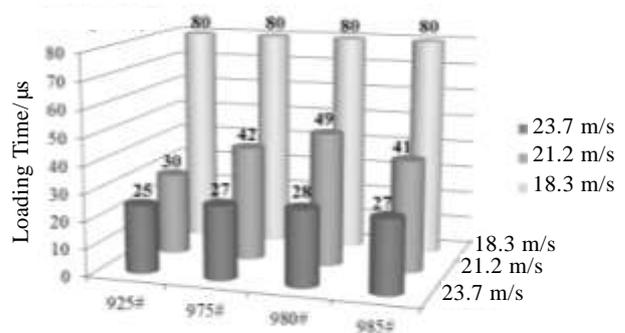


图 9 转变  $\beta$  区体积分数与撞击杆初速对双态组织 TC4 合金承载时间的影响

Fig.9 Effects of volume fraction of transformed  $\beta$  matrix and impact velocity on the loading time of bimodal microstructures of TC4 alloy

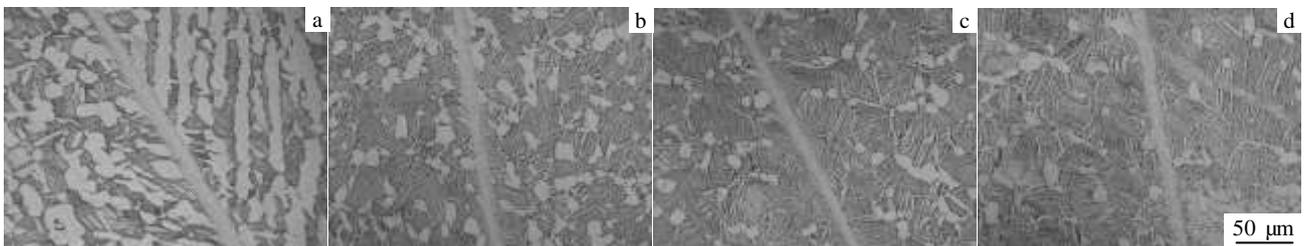


图 10 不同转变  $\beta$  区体积分数双态组织 TC4 合金在撞击杆初速 21.2 m/s 下剪切带微观形貌

Fig.10 Microscopic patterns of shearing band of TC4 alloy under 21.2 m/s impact velocity: (a) 925#, (b) 975#, (c) 980#, and (d) 985#

### 3 结 论

1) TC4 钛合金在  $(\alpha+\beta)$  两相区固溶处理时, 随着固溶温度的升高, 其转变  $\beta$  区体积分数逐渐增加。

2) 在动态压缩实验条件下, 双态组织 TC4 钛合金的动态抗压强度随着转变  $\beta$  区体积分数的增加, 呈现出先升高后降低的规律, 且在转变  $\beta$  区体积分数为 80.7% 时出现最大值; 其塑性应变则随着转变  $\beta$  区体积分数的增加, 呈现出逐渐降低的规律。

3) 在强迫剪切实验条件下, 双态组织 TC4 钛合金的绝热剪切敏感性随着转变  $\beta$  区体积分数的增加, 呈现出先降低后升高的规律, 且在转变  $\beta$  区体积分数

为 80.7% 时出现最低值; 各双态组织 TC4 钛合金均随着撞击杆初速的提高, 其绝热剪切敏感性增加。

#### 参考文献 References

[1] Wang Huigai(王悔改), Leng Wencai(冷文才), Li Shuangxiao (李双晓). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2011, 40(10): 181

[2] Montgomery J S, Wells M G H. *JOM*[J], 2001, 53(4): 29

[3] Zener C, Hollomon J H. *Journal of Applied Physics*[J], 1944, 15(1): 22

[4] Liao S C, Duffy J. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 1998, 46(11): 2201

[5] Xue Q, Meyers M A, Nesterenko V F. *Acta Materialia*[J],

- 2002, 50(3): 575
- [6] Zhang Baoyou(张宝友), Zhen Liang(甄良), Li Guoai(李国爱) *et al. Aerospace Materials and Technology*(宇航材料工艺)[J], 2004, 34(5): 96
- [7] Zhuang Shiming(庄仕明), Feng Shuping(丰树平), Wang Chunyan(王春彦) *et al. Chinese Journal of High Pressure Physics*(高压物理学报)[J], 1995, 9(2): 96
- [8] Zhang Baoyou(张宝友), Zhen Liang(甄良), Li Guo'ai(李国爱) *et al. Aerospace Materials and Technology*(宇航材料工艺)[J], 2004, 34(5): 44
- [9] Wang Xuebin(王学滨). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(12): 1854
- [10] Lee D G, Kim S, Lee S *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2001, 32: 315
- [11] Zheng C, Wang F C, Cheng X W *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 608: 53
- [12] Liu X Q, Tan C W, Zhang J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 501(1-2): 30
- [13] Hu Shisheng(胡时胜), Deng Detao(邓德涛). *Journal of Experimental Mechanics*(实验力学)[J], 1998, 13(1): 9
- [14] Zhang Xiyun(张喜燕), Zhao Yongqing(赵永庆), Bai Chengguang(白晨光). *Titanium Alloy and Applications*(钛合金及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 115

## Effects of Volume Fraction of Transformed $\beta$ Matrix on Dynamic Mechanical Properties and Sensitivity of Adiabatic Shear Banding in Bimodal Microstructures of TC4 Alloy

Peng Meiqi, Cheng Xingwang, Zheng Chao, Yang Kaiwen, Jin Dan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The dynamic mechanical properties and sensitivity of adiabatic shear banding of TC4 alloy with bimodal microstructures were investigated using Split Hopkinson Bar. The bimodal microstructures with different volume fractions of transformed  $\beta$  matrix were obtained via different heat treatments. Results show that the volume fraction of transformed  $\beta$  matrix increases with the increasing of solution temperature. In dynamic compression experiments, the dynamic strength rises at first and decreases later as the volume fraction of transformed  $\beta$  matrix increases, and reaches its maximum value when the volume fraction of transformed  $\beta$  matrix is 80.7%. While the dynamic strain decreases with the increasing of volume fraction of transformed  $\beta$  matrix. In forced shearing experiments, the sensitivity of adiabatic shear banding decreases at first and increases later as the volume fraction of transformed  $\beta$  matrix increases, and reaches its minimum value when the volume fraction of transformed  $\beta$  matrix is 80.7%. Besides, the sensitivity of adiabatic shear banding increases for the same microstructure with the increasing of impact velocity.

**Key words:** bimodal microstructure of TC4 alloy; transformed  $\beta$  matrix; dynamic mechanical properties; sensitivity of adiabatic shear banding

---

Corresponding author: Cheng Xingwang, Ph. D., Postdoctor, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68913951, E-mail: chengxw@bit.edu.cn