

## Ti-55 合金中的热塑剪切带 \*

禹金强<sup>1)</sup> 周惠华<sup>1)</sup> 沈乐天<sup>2)</sup> 徐永波<sup>1,2)</sup> 白以龙<sup>2)</sup>

1) 中国科学院金属研究所疲劳和断裂国家重点实验室, 沈阳 110015

2) 中国科学院力学研究所非线性介质力学开放实验室, 北京 100080

**摘要** 研究了三种不同处理的 Ti-55 合金在 Hopkinson 压杆上高速冲击变形时产生的热塑剪切带. 结果表明, 三种不同处理的合金试样在不同应变率下出现两种类型的剪切带: 形变剪切带和“白色”剪切带. 它们是在不同应变阶段下形成的. 对应“白色”剪切带有一应变突变. TEM 观察未发现“白色”剪切带内发生相变. 孪生是该合金动态冲击时变形的重要方式.

**关键词** 剪切带, 临界应变率, 微观结构, Ti-55 合金

**中图分类号** TG111, TG146.2

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(1999)04-0379-83

## THERMO-PLASTIC SHEAR BANDS INDUCED DURING DYNAMIC LOADING IN Ti-55 ALLOYS

YU Jinqiang<sup>1)</sup>, ZHOU Huihua<sup>1)</sup>, SHEN Letian<sup>2)</sup>, XU Yongbo<sup>1,2)</sup>, BAI Yilong<sup>2)</sup>

1) State Key Laboratory for Fatigue and Fracture of Materials, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

2) Laboratory for Non-Linear Continuous Media of Mechanics, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Correspondent: XU Yongbo, professor, Tel: (024)23843531-55324, Fax: (024)23891320

Manuscript received 1999-01-12, in revised form 1999-02-03

**ABSTRACT** The deformation and microstructure of the thermo-plastic shear bands in three kinds of differently treated Ti-alloys produced during high speed impact compression with strain rate of order of  $10^3\text{s}^{-1}$  have been investigated by split Hopkinson bar. The results show that there are two types of shear bands, deformed- and white-shear bands to be commonly recognized. They occur at different deformation stages during localization. The deformed shear bands appear first, and the white shear bands are the result of further development of the deformed shear bands. A critical strain is required for the formation of deformed- and white-shear bands under a critical strain rate during localization. Observations by TEM show that there is no evidence for phase transformation in the white shear bands, and twinning is the major deformation mode in the shear bands during dynamic loading.

**KEY WORDS** shear band, critical strain rate, microstructure, Ti-55 alloy

剪切局部化现象是材料在高应变率、大应变下常常发生的一种重要的变形方式, 由于在金相抛面上多以条带形式出现, 所以又被称为剪切带. Rogers<sup>[1]</sup> 把剪切带分为形变剪切带和“相变”剪切带, 但对“相变”剪切带内是否发生“相变”至今尚未形成一致的认识<sup>[2,3]</sup>. 由于剪切带经腐蚀后呈现白色, 故称其为“白色”剪切带. 材料在动态加载中, 剪切带的出现标志材料将发生塑性失稳. 以前的研究主要集中在钢中出现的剪切带<sup>[1-6]</sup>, 而对 Ti 合金中动态冲击条件下

局部化变形时产生的“白色”剪切带的研究较少<sup>[7]</sup>.

本文对 Ti 合金在动态冲击压缩中出现的剪切带的条件、类型、内部微观结构, 以及剪切带和材料失稳之间的关系进行了研究.

### 1 实验方法

实验选用 Ti-55 合金, 其化学成分 (质量分数, %) 如下: Al 4.0, Zr 2.0, Mo 1.0, Nb 0.8, Sn 0.25, 余为 Ti. 该合金具有强度高、重量轻、热传导率较低等特点, 在高应变率下易形成剪切带.

为了研究不同组织对剪切带形成的影响, 对合金进行了热处理. 处理条件和合金相应的组织构成见表 1.

在 Hopkinson 压杆上进行高速冲击压缩实验. 试样为圆柱状 (直径 4 mm, 高 4 mm). 实验后, 试样沿最大变形

\* 国家自然科学基金 19891180-2 资助项目

收到初稿日期: 1999-01-12, 收到修改稿日期: 1999-02-03

作者简介: 禹金强, 男, 1972 年生, 博士生

方向切开, 经镶样、预磨、抛光、腐蚀, 然后在光学亚显微镜、扫描电镜和透射电镜上进行观察.

## 2 实验结果

### 2.1 剪切带形态特征

经三种处理的 Ti-55 合金受到动态冲击时表现出相似的形变特征. 应变率较低时, 试样出现一定程度的“墩粗”现象. 即在压缩方向上变短, 而中间部位沿径向向外凸出; 应变率增至一定数值时, 在靠近试样端部的压杆两侧对称地出现形变剪切带, 此时已有微裂纹沿剪切带发生如图 1a.

进一步提高应变率便出现如图 2a 所示的白色剪切带, 带的两端已有椭圆形裂纹发生; 继续提高应变率, 裂纹进一步扩展, 同时在与压杆接触的试样边缘处形成规则的屑片 (chip)(见图 2b), 屑片之间分布着白色剪切带.

图 3 为合金在冲击载荷下形成剪切带、裂纹和屑片的示意图.

### 2.2 应变率与应变跃迁

以上结果表明, 存在一个产生剪切带的临界应变率, 即当应变速率达到一定值时才能产生剪切带. 表 2 给出了三

表 1 三种热处理条件和相应的微观组织

Table 1 Treatment condition for Ti-55 alloys and resulting microstructure

Alloy region	Heat history	Microstructure
As-received material	—	needle-like $\alpha$
$\alpha + \beta$ region	990 °C, 1 h, air-cooling 600 °C, 2 h, air-cooling	$\alpha + \beta$
$\beta$ region	1040 °C, 1 h, quenched in water 600 °C, 2 h, air-cooling	$\beta$ -transformed structure

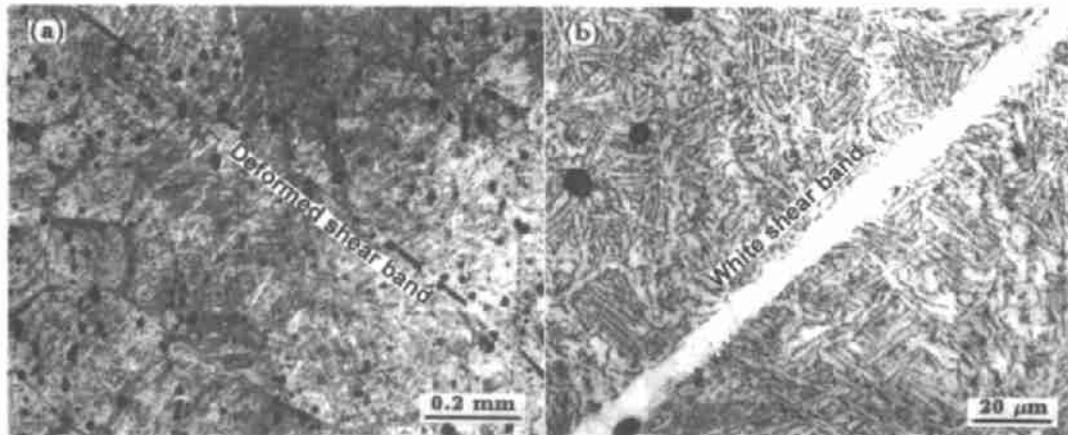


图 1 Ti-55 合金中的形变剪切带和白色剪切带

Fig.1 Deformed shear band (a) and white shear band (b) in Ti-55 alloy

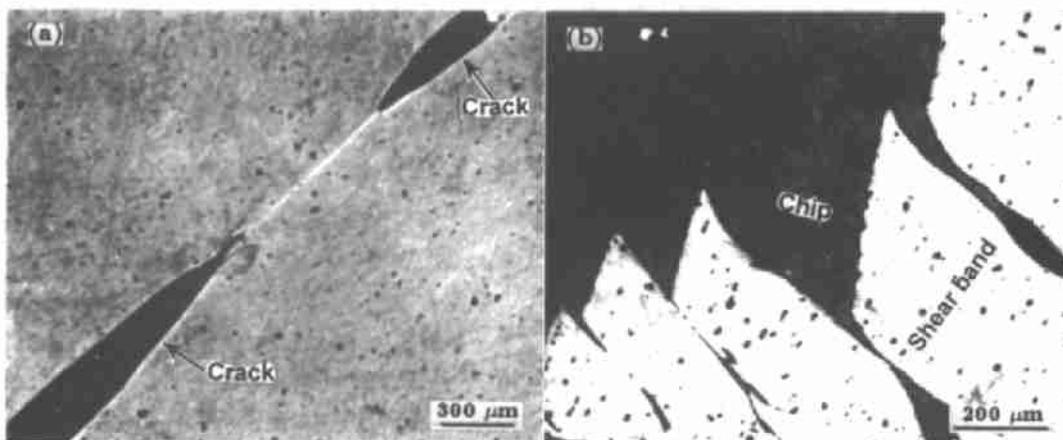


图 2 Ti-55 合金中剪切带两端的椭圆形裂纹和屑

Fig.2 Cracks (a) and chips (b) produced during dynamic loading in Ti-55 alloy

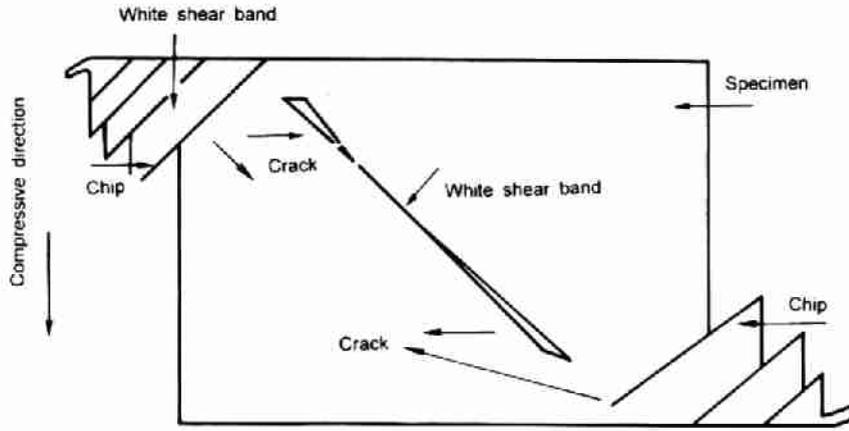


图 3 Ti-55 合金动态冲击时剪切带、裂纹与屑形成示意图

Fig.3 Schematic diagram for the formation of the band, crack and chip during dynamic impact

种不同处理的实验合金形成白色剪切带的临界应变率。从表可以看出,材料的强度越高,产生剪切带的临界应变率越低。例如,热轧态实验合金产生白色剪切带的临界应变率为  $2.0 \times 10^{-3} s^{-1}$ , 而  $\beta$  处理的合金为  $1.3 \times 10^{-3} s^{-1}$ ,  $\alpha + \beta$  处理合金则居中为  $1.85 \times 10^{-3} s^{-1}$ 。

表 2 三种不同处理的钛合金产生“白色”剪切带的临界应变率

Table 2 Critical strain rates for formation of the white shear bands in the Ti-55 alloys

Alloy treatment	Critical strain rate $10^{-3} s^{-1}$	Width of the band $\mu m$	Hardness, HV	
			Band	Matrix
As-received material	2.00	10	425	340
$\alpha + \beta$ region	1.85	9	435	351
$\beta$ region	1.30	6	461	380

本研究观察到的一个有趣现象是,当出现白色剪切带时,合金塑性剧增,文中称之为应变跃迁。图 4 为热轧态和  $\alpha + \beta$  处理的 Ti 合金应变 - 应变率响应曲线,从图可以看出,应变跃迁对应着产生白色剪切带的临界应变率。

2.3 微结构特征

图 5 是热轧态合金高速冲击后在剪切带内观察到的 TEM 像。可以发现,有大量弥散的微细相分布在剪切带内,它们的尺寸约为 6 - 30 nm,对应的电子衍射为圆环,其点阵参数与  $\alpha$  相很接近。这些结果与 Wittman<sup>[2]</sup> 等对工业纯钛进行动态冲击试验的结果相似,他们认为这些微晶相是动态再结晶的结果。

实验合金动态变形的一个明显特点是孪晶的产生。从图 6 可以看出,无论是剪切带内还是剪切带以外的合金基体都形成大量形变孪晶。所不同的是剪切带内的形变孪晶是由不同取向的孪晶“畴”组成,这些“畴”之间取向略有不同,这可能是剪切带内的高度的应变积累所致。

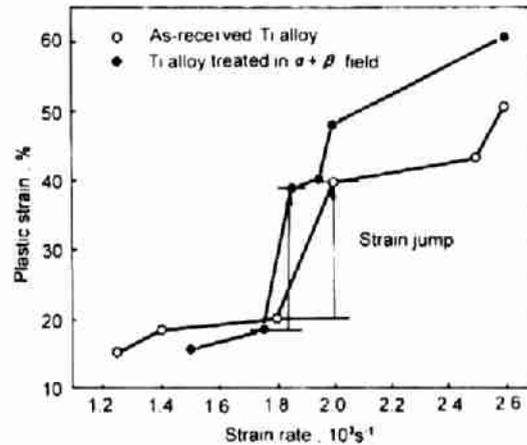


图 4 热轧态和双相处理的 Ti-55 合金应变与应变率响应曲线

Fig.4 Strain jump produced during dynamic loading in differently treated Ti-55 alloy, corresponding to the critical strain rate

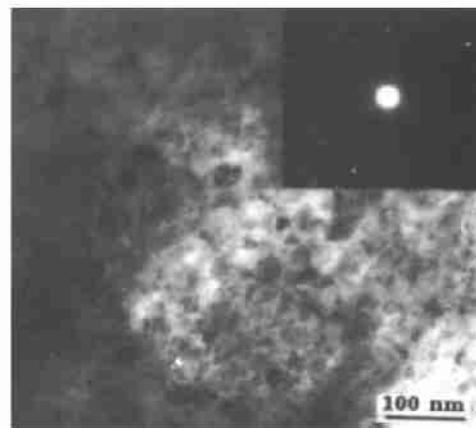


图 5 Ti-55 合金中经高速冲击试验后在剪切带内析出的微细相

Fig.5 Particles produced during dynamic loading in Ti-55 alloy

### 3 讨论

Rogers 将动态载荷下产生的剪切带分为形变带和相变带,不少研究者还将白色剪切带归为相变带<sup>[7-9]</sup>.他们认为动态载荷下材料发生局部化变形,其剪切带内的温度急剧升高甚至达到材料的相变点温度以上.所有这些温度的数据都是估算得来的,估算的数值也不尽相同,有的高出相变点温度,有的在相变点以下.近来 Hartley<sup>[10]</sup>和 Giovanola<sup>[11]</sup>采用红外和高速摄影技术测量了 1018 和 4340 钢的剪切带实际温度分别为 450 和 1000 ℃.这些值只能作为参数.本文的研究以及文献 [12] 的 Al-Li 合金的研究结果均表明,形变剪切带和白色剪切带是在动态载荷下材料形变至不同阶段时形成的.形变剪切带发生在先,而白色剪切带则是形变剪切带进一步变形的结果.大量观察表明,动态载荷下材料的变形局部化是一个由产生、发展到最后断裂的过程.在这一过程中,剪切带内的结构发生了一系列复杂变化:在形态上,可以观察到形变剪切带和白色剪切带.在一般光线下表现为“白色”,则是剪切带内材料经历了高度应变后对腐蚀剂的一种腐刻效应,并不一定是发生相变所致.

动态加载所发生的应变跃迁是本研究得到的一个重要

事实,正好对应着白色剪切带的形成.这是可以理解的变形现象.从本文的观察结果来看,白色剪切带形成时,带内出现大量的椭圆形裂纹,表明此时剪切带内的材料由于高度应变所引发的各类缺陷(包括裂纹和孔洞等)已明显聚合,在力学响应上出现一个应变突变,表明此时试样已接近断裂. Stock 和 Wingrove<sup>[13]</sup>对高碳钢进行高速冲击试验时也发现类似的现象.

大量研究表明,可将应变作为剪切带形成的力学条件.经历动态加载的材料,当应变达到一定值即临界应变时才能产生剪切带.这是不少学者进行理论分析和实验研究所得的结论. Rogers 首先指出<sup>[1]</sup>,对于一定材料可能会存在一个产生剪切带的临界应变率,而 Timothy 和 Hutchings 则不同意这个观点<sup>[14]</sup>.本研究结果表明,除了临界应变外,还存在一个临界应变率.即在临界应变率下动态加载至一定应变时,在 Ti-55 合金中才可能观察到形变剪切带的产生,而后进一步形变发展成白色剪切带.

较小应变率时,试样只在形状上发生变化.当应变率增至一定数值时,出现形变剪切带,这是变形的第一阶段(图 7a).若采用轴向残余塑性应变来描述形变剪切带出现的条

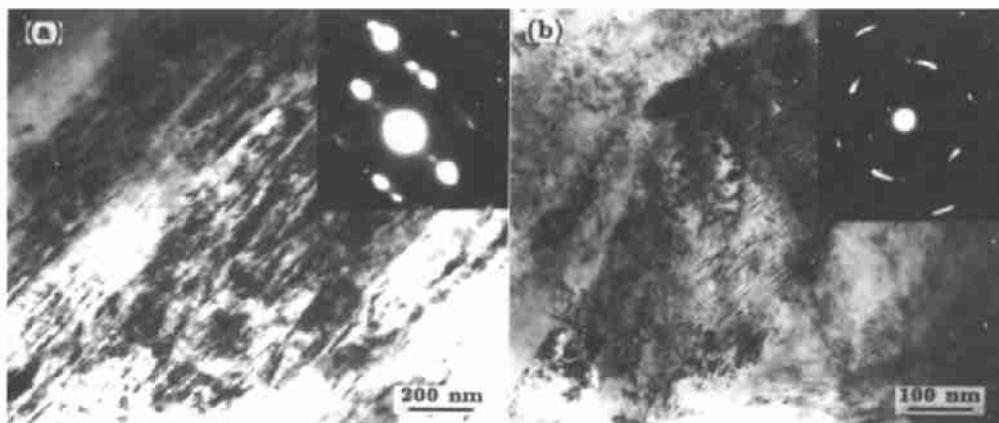


图 6 动态冲击时 Ti-55 合金基体及剪切带内的微孪晶  
Fig.6 Microtwins in alloy matrix (a) and the shear band (b)

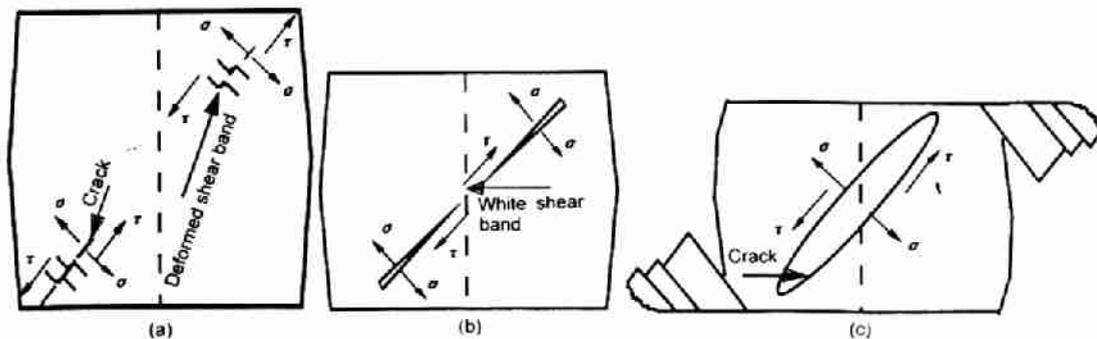


图 7 Ti-55 合金不同变形阶段剪切带和裂纹形成示意图  
Fig.7 Schematic diagram for the formation of the shear band and crack at the different deformation stages in Ti-55 alloy  
(a) shear band forming at th first stage (b) wedge crack formation (c) elliptic crack formation

件, 数值约为 0.2 左右, 这与 Timothy 和 Hutchings<sup>[14]</sup> 在弹丸冲击 Ti-6Al-4V 实验提出的剪切带形成所需的临界应变接近. 在与杆接触的试样底面附近容易形成应力应变集中, 这样在形变剪切带产生后应力波卸载时, 入射压缩波成为拉伸波, 在拉伸应力作用下, 首先在形变剪切带内出现裂纹. 当达到临界应变后产生形变剪切带, 在随后卸载产生的拉伸应力作用下使裂纹沿剪切带方向扩展而形成楔形裂纹(图 7b). 高于临界应变时, 试样可在中心出现椭圆形孔洞, 而在边缘处产生有规则的屑片. 这时, 试样中心位置受到的拉伸应力较大, 因而形成中心宽两端尖的裂纹(图 7c). 与 Staish<sup>[15]</sup> 的模型不同, Staish 认为裂纹应先在试样中心产生. 实际上裂纹形核的位置可以在中心也可以在边缘, 与应力集中有关.

#### 4 结论

(1) 三种不同处理的 Ti-55 合金在临界应变率下, 应变至一定值时先后出现形变剪切带和“白色”剪切带. “白色”剪切带的产生对应一个应变突变.

(2) 形变剪切带先于“白色”剪切带出现, 它们是在不同应变阶段下形成的.

(3) 剪切带内形成一些不同取向的微小孪晶, 没有证据表明剪切带内发生相变.

(4) 剪切变形对材料的强度十分敏感, 即: 强度越高, 产生剪切带的临界应变率越低, 剪切带的宽度越窄.

中国科学院金属研究所李东研究员为本工作提供了材料, 作者深表谢忱.

#### 参考文献

- [1] Rogres H C. *Ann Rev Mater Sci*, 1979; 9: 283
- [2] Wittman C L, Meyers M A, Pak R H. *Metall Trans*, 1990; 21A: 706
- [3] Giovanola J H. *Mech Mater*, 1988; 7: 73
- [4] Xu Y B, Bai Y L, Xue Q, Shen L T. *Acta Mater*, 1996; 44: 1917
- [5] Zurek A K. *Metall Tans*, 1994; 25A: 2483
- [6] Cho K, Chi Y C, Duffy J. *Metall Trans*, 1990; 21A: 1161
- [7] Glenn R C, Leslie W C. *Metall Trans*, 1971; 2: 2945
- [8] Wingrove A L. *J Aust Inst Met*, 1971; 16: 67
- [9] Meyers M A, Wittman C L. *Metall Trans*, 1990; 21A: 3153
- [10] Hartley K A, Duffy J, Hawley R H. *J Mech Phys Solids*, 1987; 35: 283
- [11] Giovanola J H. *Mech Mater*, 1988; 7: 59
- [12] Zhong W L, Zhang Y, Xu Y B, Shen L T, Bai Y L. *Acta Metall Sin*, 1999; 35: 384  
(钟万里, 张 匀, 徐永波, 沈乐天, 白以龙. *金属学报*, 1999; 35: 384)
- [13] Stock T A C, Wingrove A L. *J Mech Eng Sci*, 1971; 13: 110
- [14] Timothy S P, Hutchings J M. In: Blazynski T E ed., *Proc 7th Int Conf on High Energy Rate Fabrication*, University of Beeds., 1981: 9
- [15] Staish V K, Prasad Y V, Biswas R K. *Metall Mater Trans*, 1994; 25A: 2173