

# 片层宽度对 TC21 钛合金动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响规律

靳 丹, 程兴旺, 郑 超, 杨凯文, 彭美旗

(北京理工大学 冲击环境材料技术重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 研究了冷却速率对 TC21 钛合金片层宽度的影响, 并通过分离式霍普金森压杆, 进一步研究了片层宽度对动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响。结果表明: 随着冷却速率的降低, 片层组织 TC21 钛合金的片层宽度由 0.57  $\mu\text{m}$  增宽到 6.49  $\mu\text{m}$ ; 在动态压缩试验条件下, 片层组织随着片层宽度增加, 动态强度降低, 而塑性应变呈现出相反的规律; 在强迫剪切试验条件下, 片层组织随着片层宽度增加, 其绝热剪切敏感性降低, 而随着撞击杆初速的提高, 每种片层组织的绝热剪切敏感性均提高。

**关键词:** TC21 钛合金; 片层组织; 动态压缩性能; 绝热剪切敏感性

**中图分类号:** TG146.2\*3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2016)11-2953-06

钛合金具有比强度高、密度低、耐腐蚀、耐高温等优异性能, 因而在航空航天等领域得到广泛应用。但因其低的热导率及应变(率)硬化能力, 使其在高速冲击、高应变率加载条件下极易发生绝热剪切局域化变形, 产生绝热剪切带, 并最终导致剪切破坏。

自从 C. Zener 和 J. H. Hollomon<sup>[1]</sup>开创性的工作后, 对绝热剪切带的研究得到了快速发展, 目前众多学者已对钛合金的动态压缩性能及其绝热剪切敏感性开展了大量研究, 其中尤以对 TC4 钛合金的研究最为广泛。Chao Zheng 等人<sup>[2]</sup>研究了片层宽度对 TC4 钛合金动态压缩性能的影响。结果表明, TC4 钛合金的动态抗压强度随着片层宽度的减小而增大, 而塑性应变呈现相反规律。D. G. Lee 等人<sup>[3]</sup>研究了 TC4 钛合金的片层、等轴和双态 3 种组织的动态扭转性能。结果表明, 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。X. G. Liu 等人<sup>[4]</sup>研究了 TC4 钛合金片层和双态组织的动态压缩性能。结果表明, 在应变率 4000  $\text{s}^{-1}$  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  $\text{s}^{-1}$  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。L. E. Murr 等人<sup>[5]</sup>研究了弹道冲击实验中 TC4 钛合金靶板的绝热剪切带特征。结果表明: 随着冲击速率的提高, 绝热剪切带的数量增

多, 宽度增加。

TC21 钛合金是我国拥有自主知识产权的 ( $\alpha+\beta$ ) 两相钛合金, 是目前我国高强高韧钛合金中综合力学性能匹配较好的钛合金之一<sup>[6,7]</sup>。冯亮等人<sup>[8]</sup>研究了固溶温度对 TC21 钛合金组织和力学性能的影响。研究发现固溶温度高于  $\beta$  转变点时得到片层组织, 原始  $\beta$  晶界上分布着清晰的晶界  $\alpha$  相,  $\beta$  晶粒内为  $\alpha/\beta$  束丛; 与原始组织相比, 合金的抗拉强度和塑性均降低。奚向红等人<sup>[9]</sup>研究了固溶时间对 TC21 钛合金显微组织的影响。结果表明, 固溶时间的延长使得  $\alpha \rightarrow \beta$  的转变更加充分, 组织变得更加均匀, 但不能使显微组织形态得到较大改变。陈军<sup>[10]</sup>和侯智敏<sup>[11]</sup>等人研究了冷却方式对 TC21 钛合金显微组织及其静态力学性能的影响。结果表明: 固溶温度高于相变点时, 冷速降低导致片层组织中  $\alpha$  片层宽度增加, 强度降低, 塑性增强; 固溶温度低于相变点时, 冷速降低导致初生  $\alpha$  相含量明显增加,  $\beta$  转变组织中的次生  $\alpha$  相也明显宽化, 强度降低, 塑性增强。

综上所述可以发现, 目前国内对 TC21 钛合金的研究主要集中在热处理工艺对显微组织和静态力学性能的影响, 有关动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的研究鲜有报道。本研究通过控制冷速实现了对片层组织 TC21 钛合金片层宽度的调控, 并进一步研究了组织变化对动态压缩性能及绝热剪切敏感性。

收稿日期: 2015-11-03

作者简介: 靳 丹, 女, 1992 年生, 硕士生, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, 电话: 010-68913951, E-mail: 793250484@qq.com

# 1 实验

本研究使用的原始材料为北京航空材料研究院提供的  $\alpha+\beta$  两相区锻造的 TC21 钛合金, 其名义成分如表 1 所示, 微观组织结构如图 1 所示。由图可见, 原始组织为典型的双态组织, 由等轴状  $\alpha$  相、片层状  $\alpha$  相和  $\beta$  相构成。经淬火金相法测定合金的  $\beta$  转变点为  $(945 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 。

本研究设计了 3 种热处理制度, 其中 L1, L2, L3 分别为 3 种不同片层宽度的片层组织。具体工艺如表 2 所示。其中, 空冷的冷却速率约为  $120 ^\circ\text{C}/\text{min}$ , 炉冷的冷却速率约为  $5 ^\circ\text{C}/\text{min}$ , 慢炉冷的冷却速率约为

表 1 TC21 钛合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of the TC21 titanium alloy (wt%)

Al	Mo	Nb	Sn	Zr	Cr	Fe	Si	Ti
6.2	2.96	2.08	2.06	2.02	1.25	0.05	0.02	Bal.

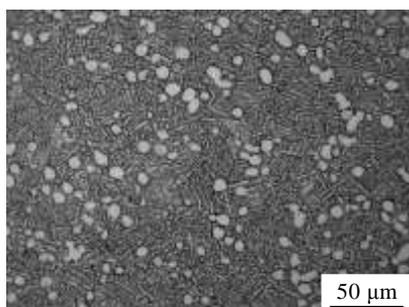


图 1 TC21 钛合金的原始组织  
Fig.1 Optical microstructure of TC21 Alloy

表 2 TC21 钛合金热处理工艺  
Table 2 Heat treatments of TC21 alloy

Designation	Heat treatment
L1	$1000 ^\circ\text{C}/1 \text{ h AC}$
L2	$1000 ^\circ\text{C}/1 \text{ h FC}$
L3	$1000 ^\circ\text{C}/1 \text{ h SFC}$

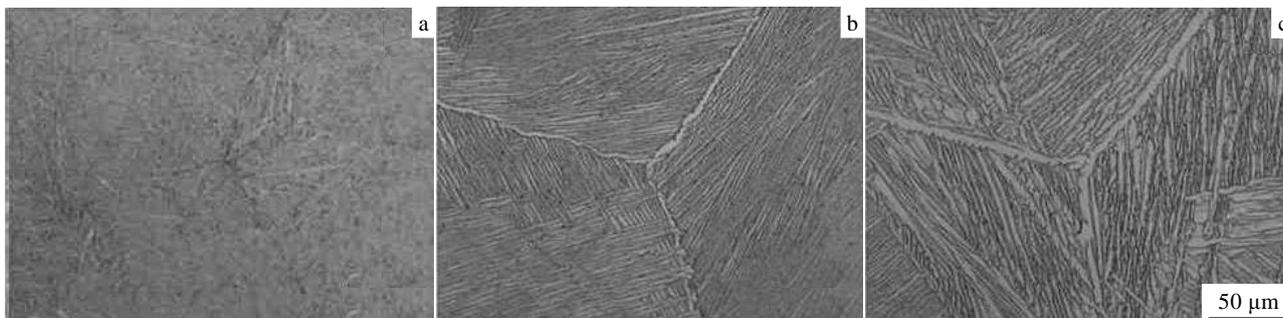


图 2 不同热处理工艺获得的 3 种 TC21 钛合金片层组织  
Fig.2 Optical microstructures of TC21 alloy obtained via different heat treatments: (a) L1, (b) L2, and (c) L3

$1 ^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

采用电火花线切割技术切取金相试样。试样经研磨抛光后, 使用腐蚀液 ( $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:5$ ) 腐蚀 4~6 s, 并采用 Zeiss Z10 光镜进行观察, 利用其附带的金相分析软件 Micro-image Analysis & Process 测量组织结构中相的大小和比例等。

依据国标 GBT 228-2002 及 GBT 7314-2005 分别切取静态拉伸及压缩试样。室温静态拉伸和压缩试验在 Instron 万能试验机上进行, 加载应变率为  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。静拉伸断口使用冷场发射扫描电镜 Hitachi S-4800 观察。

利用分离式霍普金森压杆进行动态压缩及强迫剪切试验, 得到不同应变率加载条件下的真应力-真应变曲线及电压-时间曲线。动态压缩试样为柱形试样, 强迫剪切试样为帽形试样。将试验后的帽形试样沿轴线切开, 经研磨、抛光、腐蚀后在 Zeiss Z10 光镜下观察绝热剪切带形貌。

# 2 结果与讨论

## 2.1 显微组织

通过制定不同的热处理制度, 获得了 3 种具有不同片层宽度的片层组织, 如图 2 所示。由图 2 可知, 当固溶温度高于  $\beta$  转变点时, 均获得了片层组织, 且随着冷却速率的降低, 片层宽度逐渐增宽。片层组织 L1 的片层宽度约为  $0.57 \mu\text{m}$ , 片层组织 L2 的片层宽度约为  $2.49 \mu\text{m}$ , 片层组织 L3 的片层宽度约为  $6.49 \mu\text{m}$ 。对片层组织 TC21 钛合金中片层宽度的控制, 实质上是对片层  $\alpha$  相形核长大过程的控制, 其形核率、长大速率都与冷却速率密切相关。片层  $\alpha$  相的晶核首先在晶界形成并且长大, 当冷却到一定程度后, 出现少量  $\alpha$  片层开始从晶界向晶内生长; 片层组织 L3 的冷却速率较低, 导致其过冷度很小, 低的过冷度使得已形成的  $\alpha$  片层有充足的时间长大并贯穿整个  $\beta$  晶粒。因此, 片层组织 L3 具有最宽的片层宽度。

### 2.2 TC21 钛合金的静动态力学性能

#### 2.2.1 静态力学性能

针对所获得的 3 种片层组织，分别进行了洛氏硬度、静态拉伸及静态压缩性能测试，其结果如表 3 所示。由表 3 可知，3 种片层组织随着冷却速率的降低，其洛氏硬度变化不明显；随着片层宽度的增加，其屈服强度、抗拉强度和抗压强度呈现出依次降低的规律；断面收缩率和断后伸长率则呈现出相反的规律，即随着片层宽度的增加而增加。

将 Hall-Petch 公式作为目标函数，通过 Matlab 数值处理软件将片层宽度与抗拉强度的数值进行拟合，如图 3 所示。由图 3 可见，试验值与理论值符合的较好，这也就表明了抗拉强度与片层宽度的关系满足 Hall-Petch 公式。由此可知，随着片层宽度的增加，片层组织的强度明显降低。这是因为随着片层宽度增加， $\alpha/\beta$  相界相应减少，位错滑移阻力减小，位错难以塞积，故而具有较宽片层宽度的片层组织 L3 具有最低的抗拉强度。

#### 2.2.2 动态压缩性能

针对片层组织 L1-L3，分别进行了应变率为 2000、2500、3000  $s^{-1}$  的动态压缩试验。图 4 为 3 种片层组织 TC21 钛合金在同一应变率下的真应力-真应变曲线。各应变率下 3 种片层组织的动态抗压强度、塑性应变和冲击吸收功经计算列于表 4。由图 4 及表 4 可知，在同一应变率下，动态抗压强度随着片层宽度的增加而降低，而塑性应变则呈现出相反的规律，即随着片

表 3 TC21 钛合金的静态力学性能

Table 3 Mechanical properties of TC21 alloys

Designation	Hardness, HRC	YS /MPa	UTS /MPa	EL /%	RA /%	UCS /MPa
L1	31	1001	1135	6.0	9.4	1151
L2	29	899	995	12.1	18.6	1053

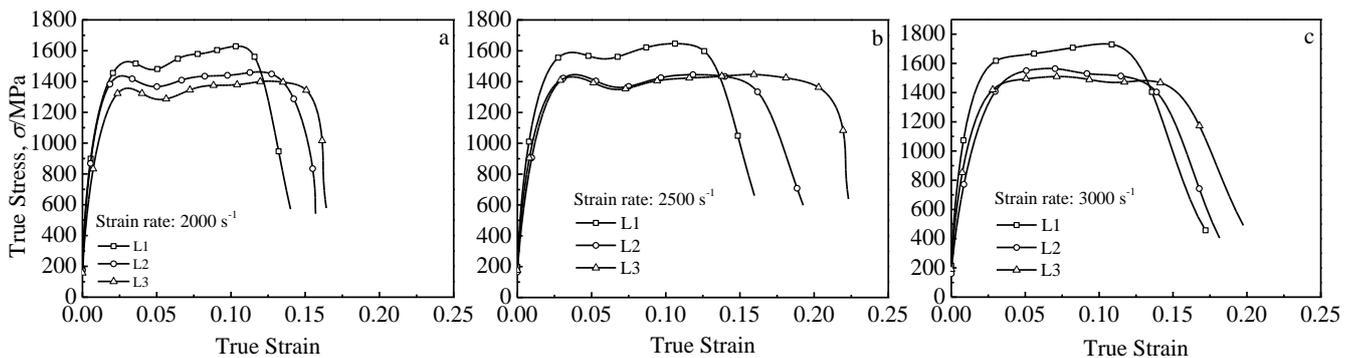


图 4 片层组织 TC21 钛合金的真应力-真应变曲线

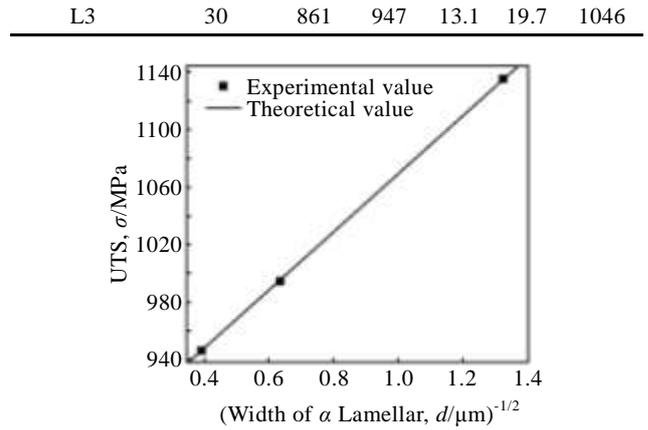


图 3 抗拉强度与片层宽度的关系

Fig.3 Relationship between ultimate yield strength and thickness of  $\alpha$  lamellar

层宽度的增加而增加。以应变率 3000  $s^{-1}$  为例，片层组织 L2 的动态抗压强度为 1525 MPa，较之片层组织 L1 的抗压强度 1672 MPa 降低了 8.8%；片层组织 L3 的动态抗压强度为 1488 MPa，较之片层组织 L2 进一步降低了 2.4%；片层组织 L2 的塑性应变为 13.89%，较之片层组织 L1 的塑性应变 12.85%增加了 8.1%；片层组织 L3 的塑性应变为 15.74%，较之片层组织 L2 进一步增加了 13.3%。

由表 3 及表 4 可知，当加载应变率由  $10^{-3} s^{-1}$  提高到  $10^3 s^{-1}$  时，3 种片层组织的抗压强度均有了大幅提高，体现出显著的应变率强化效应，表明片层组织 TC21 钛合金是应变率敏感材料。

### 2.3 绝热剪切敏感性

钛合金在高应变率的加载条件下，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，直至微裂纹和微孔洞的贯通连接而最终导致材料失效。这是因为在高应变率加载条件下，钛合金由于其低的热导率，导致材料在发生变形时所产生的大量热量无法及时传导而造成绝热温升，从而引起热软化

Fig.4 True stress-strain curves of different microstructures of TC21 alloy: (a) 2000 s<sup>-1</sup>, (b) 2500 s<sup>-1</sup>, and (c) 3000 s<sup>-1</sup>

表 4 片层组织 TC21 钛合金的动态压缩性能

Table 4 Dynamic compression properties of the TC21 alloys with α lamellar microstructures

Designation	Flow strength/MPa			Strain/%			Energy absorbed/MJ m <sup>-3</sup>		
	2000 s <sup>-1</sup>	2500 s <sup>-1</sup>	3000 s <sup>-1</sup>	2000 s <sup>-1</sup>	2500 s <sup>-1</sup>	3000 s <sup>-1</sup>	2000 s <sup>-1</sup>	2500 s <sup>-1</sup>	3000 s <sup>-1</sup>
L1	1560	1591	1672	12.12	13.36	12.85	178	201	203
L2	1427	1405	1525	14.04	16.48	13.89	191	221	194
L3	1358	1403	1488	15.59	21.06	15.74	201	286	220

效应,当热软化效应超过了由于塑性变形引起的应变硬化和应变率硬化效应,则会形成局域化变形的区域,这个高度局域化的变形区域被定义为绝热剪切带<sup>[10]</sup>。绝热剪切敏感性则表征了绝热剪切带形成的难易程度。

通过强迫剪切试验,得到了不同撞击杆初速下不同片层组织试样的电压-时间曲线,可用此曲线表征材料的绝热剪切敏感性。

根据一维应力波理论,以及本试验所采用 SHPB 装置的参数,冲击试验过程中的加载时间为:

$$t = \frac{2l}{c} \quad (1)$$

式中, *l* 为撞击杆的长度,为 200 mm; *c* 为纵波在压杆(马氏体时效钢)中的传播速度,约为 5000 m/s。

根据上式可得本试验的加载时间为 80 μs,因此,在加载过程中,若试样只发生均匀的塑性变形,则其承载时间应约为 80 μs;若试样发生绝热剪切变形局域化或者断裂失效而提前卸载,其承载时间小于 80 μs。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。

图 5 为 3 种片层组织 TC21 钛合金帽形试样在同一撞击杆初速下的电压-时间曲线。由图 5 可见,当撞击杆初速为 18.3 m/s 时,3 种片层组织的承载时间均为 80 μs 而未发生剪切失效;当撞击杆初速为 21.2、23.7 m/s 时,3 种片层组织均发生剪切失效,且其承载时间呈现出一致的规律,即随着片层宽度的增加而增加。

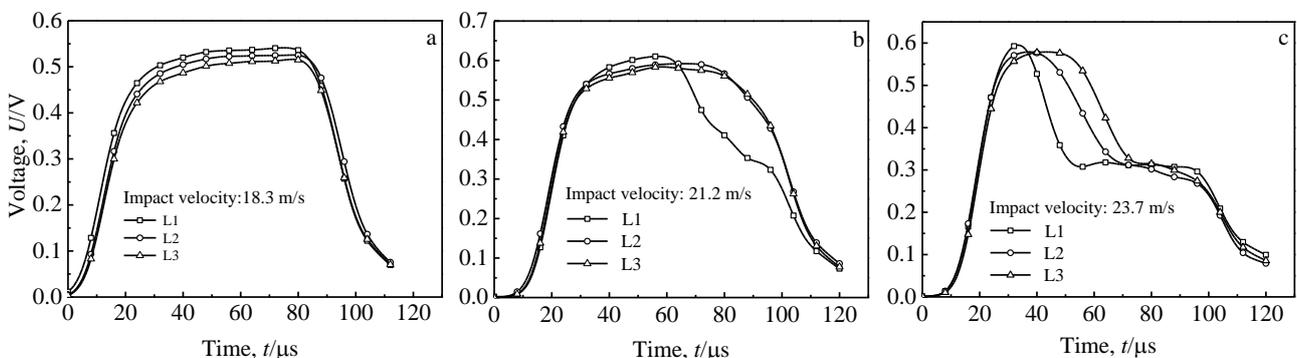


图 5 不同片层组织强迫剪切条件下的电压-时间曲线

Fig.5 Voltage-time curves of TC21 alloys with lamellar microstructures under forced shearing: (a) 18.3 m/s,

图 6 为承载时间随着片层宽度及撞击杆初速的变化规律。当撞击杆初速为 21.2 m/s 时,片层组织 L1 的承载时间为 58 μs,片层组织 L2 的承载时间为 70 μs,片层组织 L3 的承载时间为 76 μs;当撞击杆初速为 23.7 m/s 时,片层组织 L1 的承载时间为 34 μs,片层组织 L2 的承载时间为 39 μs,片层组织 L3 的承载时间为 48 μs。由此可知,3 种片层组织的绝热剪切敏感性随着片层宽度的增加而降低,其绝热剪切敏感性从高到低依次为:片层组织 L1,片层组织 L2,片层组织 L3。这是因为随着片层宽度增加,其塑性变形能力越好,使得局域化变形不易发生,且位错不易在 α 相中缠结增值。

通过比较同一片层组织 TC21 钛合金帽形试样在不同撞击杆初速下的承载时间可知,同一片层组织的承载时间随着撞击杆初速的提高而减小。由此可见,材料的绝热剪切敏感性随撞击杆初速的提高而增加。究其原因是撞击杆初速的提高,使得材料获得了更多的能量,其局域化变形程度加剧,故更易形成绝热剪切带,最终导致绝热剪切破坏。

图 7 为 3 种片层组织 TC21 钛合金在撞击杆初速为 23.7 m/s 时的绝热剪切带微观形貌。由图 7 可知,3 种片层组织均产生了绝热剪切带,且绝热剪切带均呈现出“白亮”特征,这就证实了 3 种片层宽度的 TC21 钛合金材料的失效均是绝热剪切带的萌生和扩展导致的。

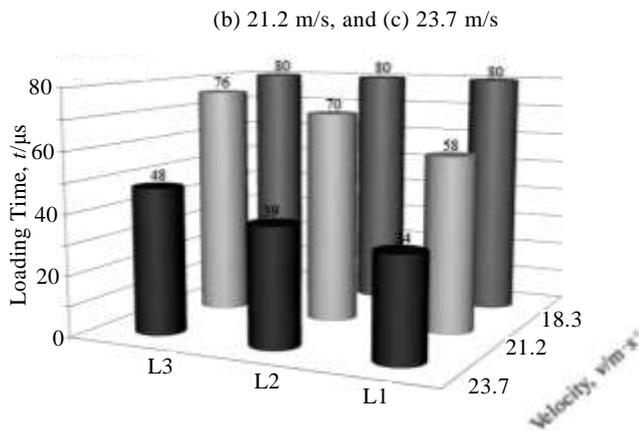


图 6 片层组织 TC21 的承载时间

Fig.6 Loading time of TC21 alloy with lamellar microstructures

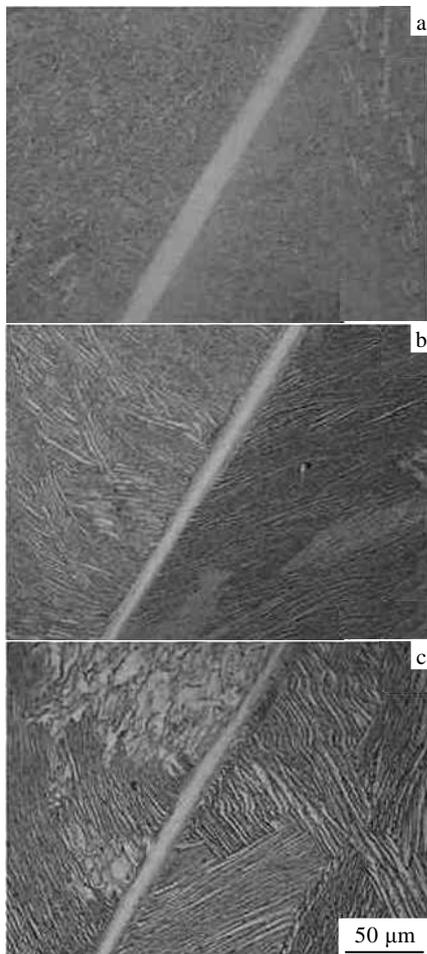


图 7 撞击杆初速为 23.7 m/s 时 3 种片层组织剪切带微观形貌

Fig.7 Optical microstructures of the adiabatic shear bands observed in TC21 alloys at impact velocity of 23.7 m/s: (a) L1, (b) L2, and (c) L3

### 3 结 论

1) 片层组织 TC21 钛合金随着冷却速率的降低, 片层宽度增加明显, 由约 0.57 μm 增加到约 6.49 μm。

2) 3 种片层组织 TC21 钛合金均具有一定的应变率强化效应; 在同一应变率的加载条件下, 片层组织 TC21 钛合金的动态抗压强度随着片层宽度的增加而降低, 而塑性应变呈现出相反的规律。

3) 在同一撞击杆初速条件下, 3 种片层组织 TC21 钛合金的绝热剪切敏感性随着片层宽度的增加而降低; 在不同撞击杆初速条件下, 同一片层组织的绝热剪切敏感性随应变率的增加而提高。

### 参考文献 References

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

[2] Zheng Chao, Wang Fuchi, Cheng Xingwang *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 608: 53

[3] Lee D G, Kim S, Lee S *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2001, 32(2): 315

[4] Liu X Q, Tan C W, Zhang J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 501(1-2): 30

[5] Murr L E, Ramirez A C, Gaytan S M *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 516: 205

[6] Gao Jing(高 敬), Yao Li(姚 丽). *World Nonferrous Metals*(世界有色金属)[J], 2001(2): 4

[7] Zou Jianxin(邹建新). *Aerospace Materials and Technology*(宇航材料工艺)[J], 2004, 34(1): 23

[8] Feng Liang(冯 亮), Qu Henglei(曲恒磊), Zhao Yongqing(赵永庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(3): 341

[9] Xi Xianghong(奚向红). *Journal of Anhui Vocational College of Metallurgy and Technology*(安徽冶金科技职业学院学报)[J], 2012, 22(1): 5

[10] Chen Jun(陈 军), Qu Henglei(曲恒磊), Zhao Yongqing(赵永庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(3): 307

[11] Hou Zhimin(侯智敏), Mao Xiaonan(毛小南), Lei Wenguang(雷文光) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(1): 581

## Effects of Lamellar $\alpha$ Thickness on Dynamic Mechanical Properties and Sensitivity to Adiabatic Shear Banding of TC21 Alloy

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

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

**Abstract:** The  $\alpha$  lamellar microstructures with different thicknesses were obtained by proper heat treatments of TC21 alloy, and the dynamic mechanical properties and sensitivity to adiabatic shear banding were investigated by the Split Hopkinson Pressure Bar. The results show that the thickness of lamellar  $\alpha$  increases from 0.57 to 6.49  $\mu\text{m}$  with the decreasing of the cooling rate. Under the dynamic compression condition, the dynamic strength decreases as the thickness of lamellar  $\alpha$  increases; while the dynamic strain exhibits an opposite trend. Under the dynamic shear condition, the sensitivity to adiabatic shear banding increases with the decreasing of the thickness of lamellar  $\alpha$  at the same impact velocity, and the sensitivity to adiabatic shear banding increases for the same microstructure with the increasing of impact velocity.

**Key words:** TC21 alloy; lamellar microstructure; dynamic mechanical properties; sensitivity to adiabatic shear banding

---

Corresponding author: Cheng Xingwang, 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