

# 高速冲击载荷下 Ti6242 钛合金的绝热剪切行为及裂纹扩展机理

彭德平<sup>1,2</sup>, 刘筱<sup>1,2</sup>, 贺丹丹<sup>1</sup>, 万步炎<sup>1</sup>, 陈阳<sup>3</sup>, 刘文辉<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湘潭华进重装有限公司, 湖南 韶山 411300;

3. 湖南胜利湘钢钢管有限公司, 湖南 湘潭 411101)

**摘要:** 为了研究 Ti6242 钛合金在不同冲击载荷下的绝热剪切行为和裂纹扩展机理, 采用分离式 Hopkinson Bar 技术, 在室温下对其进行冲击平均应变速率为  $3069 \sim 11337 \text{ s}^{-1}$  的冲击试验, 使用光学显微镜对其微观组织中的绝热剪切行为进行分析, 并建立了裂纹形核及扩展模型。结果表明: Ti6242 钛合金的抗冲击强度对冲击平均应变速率不敏感, 塑性随着冲击平均应变速率的增加呈现增加趋势; 绝热剪切带的数量随着冲击平均应变速率的增加而增加, 片层状分布的  $\alpha/\beta$  相会阻碍绝热剪切带的扩展, 导致绝热剪切带出现分叉现象; 高速冲击载荷下, 孔洞在绝热剪切带内形核、长大、合并, 最终形成微裂纹, 微裂纹通过与前端孔洞合并继续扩展而形成宏观裂纹, 导致材料断裂失效。

**关键词:** 高速冲击载荷; Ti6242 钛合金; 绝热剪切带; 裂纹;  $\alpha/\beta$  相

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.033

**中图分类号:** TG389

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0224-06

## Adiabatic shear behavior and crack propagation mechanism on Ti6242 titanium alloy under high-speed impact loading

Peng Deping<sup>1,2</sup>, Liu Xiao<sup>1,2</sup>, He Dandan<sup>1</sup>, Wan Buyan<sup>1</sup>, Chen Yang<sup>3</sup>, Liu Wenhui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Xiangtan Huajin Heavy Equipment Co., Ltd., Shaoshan 411300, China;

3. Hunan Shengli Xianggang Steel Pipe Co., Ltd., Xiangtan 411101, China)

**Abstract:** In order to study the adiabatic shear behavior and crack propagation mechanism of Ti6242 titanium alloy under different impact loading, the impact test with average impact strain rate of  $3069 \sim 11337 \text{ s}^{-1}$  at room temperature was carried out by split Hopkinson Bar technique. Then, the adiabatic shear behavior in microstructure was analyzed by optical microscope, and the crack nucleation and propagation model was established. The results show that the impact strength of Ti6242 titanium alloy is not sensitive to average impact strain rate, and the plasticity displays an increasing trend with the increasing of the average impact strain rate. The number of adiabatic shear bands increases with the increasing of the average impact strain rate, and  $\alpha/\beta$  phase in lamellar distribution hinders the propagation of adiabatic shear band, resulting in the bifurcation phenomenon of adiabatic shear bands. Under the high-speed impact loading, the pores nucleate, grow and merge in the adiabatic shear band, and finally form micro-cracks, which continue to expand by merging with the front-end holes to form macro-cracks, resulting in fracture failure of material.

**Key words:** high-speed impact loading; Ti6242 titanium alloy; adiabatic shear band; crack;  $\alpha/\beta$  phase

钛合金具有密度小、强度大、耐腐蚀等一系列优点, 被广泛应用于航空、航天等领域<sup>[1-3]</sup>。近年来, 钛合金的应用领域已经拓展到海洋领域, 钛合金管材

已经被发达国家广泛应用于船舶与海洋工程装备, 提高了装备的安全可靠性<sup>[4]</sup>。钛合金管在航空航天和海洋的服役过程中, 不可避免地要承受冲击载荷, 研究其动态力学行为和微结构演变机理至关重要。

在冲击过程中绝热剪切现象普遍存在, 不同材料对绝热剪切的敏感性存在差别。张磊等<sup>[5]</sup>发现  $\alpha$  钛合金 TA6 材料属于绝热剪切不敏感材料, 而  $\beta$  型和  $(\alpha+\beta)$  型钛合金 TA6 材料属于绝热剪切敏感材料。孙坤等<sup>[6]</sup>发现  $\beta$  相晶界和次生  $\alpha$  相对绝热剪切带的扩展具有阻碍作用, 绝热剪切带在片层组织中

收稿日期: 2022-03-23; 修订日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51905166, 52071139);

湖南省教育厅优秀青年基金项目 (21B0471)

作者简介: 彭德平 (1987-), 男, 博士研究生

E-mail: eden7321@163.com

通信作者: 刘筱 (1988-), 女, 博士, 副教授, 博士生导师

E-mail: liuxiao0105@163.com

扩展时，必须冲断这些晶界，会导致绝热剪切带出现分叉现象。Yang Y 等<sup>[7]</sup>指出 ( $\alpha+\beta$ ) 型双态组织钛合金中剪切带萌生的临界应变小于  $\beta$  型钛合金中的临界应变。( $\alpha+\beta$ ) 型双态组织钛合金比  $\beta$  型钛合金更容易发生绝热剪切局部化变形。周琳等<sup>[8]</sup>发现新型 Ti-4Al-5Mo-6Cr-5V-1Nb 合金在低温高应变速率区域易发生绝热剪切行为。彭美旗等<sup>[9]</sup>研究了次生片层  $\alpha$  相的宽度对 ( $\alpha+\beta$ ) 型双态组织 TC4 钛合金的动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响，发现次生片层  $\alpha$  相的宽度增加，动态抗压强度增加，同时绝热剪切敏感性降低。研究发现，绝热剪切带的产生极易诱导裂纹的形核、长大和扩展，最终材料发生失效<sup>[10-13]</sup>。Liu X 等<sup>[12]</sup>研究了 Ti-5Al-2.5Cr-0.5Fe-4.5Mo-1Sn-2Zr-3Zn 合金，发现绝热剪切带内部主要为动态再结晶形式的细晶，尤其在裂纹尖端的晶粒的细化程度最为明显，绝热剪切带内的裂纹是由再结晶区域与周围高加工硬化区之间的不协调引起。Mendoza I 等<sup>[11]</sup>研究了 Ti-5Al-2.5Cr-0.5Fe-4.5Mo-1Sn-2Zr-3Zn 合金，发现绝热剪切带内通过孔洞形核机制诱发裂纹，同时也观察到裂纹先于剪切带产生。

Ti6242 是一种力学性能优良的近  $\alpha$  钛合金，目前大量的研究<sup>[14-17]</sup>主要集中在其疲劳性能、高温变形行为以及焊接性能，针对其在高速冲击载荷下的组织性能以及断裂行为的研究鲜有报道。本文利用分离式 Hopkinson Bar 技术，对环轧态 Ti6242 钛合金进行室温下平均应变速率为 3056~11337 s<sup>-1</sup> 的冲击试验，对不同冲击载荷下的动态力学行为、绝热剪切行为和断裂机理展开研究，为提高该材料的使用范围提供理论依据。

1 试验材料和方法

试验采用环轧管 Ti6242 钛合金，原材料来自俄罗斯上萨尔达冶金生产联合公司 (VSMPO)，其

名义成分如表 1 所示，其中，添加的铝是一种  $\alpha$  稳定元素、钼是一种强  $\beta$  元素、锡和锆均为固溶强化元素。为了获得较大的塑性变形和应变速率，制备直径为  $\Phi 4$  mm、高度为 3 mm 的 Ti6242 钛合金圆柱形试样，圆柱试样的轴线与环轧法线平行，采用霍普金森杆沿轴线进行冲击平均应变速率分别为 3069、6190、7449、7585 和 11337 s<sup>-1</sup> 的室温冲击试验。

表 1 Ti6242 钛合金化学成分 (%, 质量分数)  
Table 1 Chemical compositions of Ti6242 titanium alloy  
(%, mass fraction)

Al	Zr	Sn	Mo	Si	Fe	C	O	Ti
5.80	3.78	1.88	1.91	0.08	0.02	0.01	0.11	余量

为了探索不同冲击载荷下组织的演变规律和裂纹等微观形貌的形成机理，对冲击后的样品沿轴向观察金相。依次用 500#、800#、1000#、1500#、2000#和 2500#砂纸进行打磨，随后使用 1.5  $\mu\text{m}$  抛光膏抛光，最后采用配比含量为 10 mL 氢氟酸、30 mL 硝酸和 70 mL 水的腐蚀剂进行 4~8 s 的腐蚀，酒精喷洗吹干后，使用德国蔡司 Axiovert 40MAT 金相显微镜进行金相观察。

2 结果与讨论

图 1 为不同冲击平均应变速率下试样的宏观形貌。由图 1 可知，当冲击平均应变速率为 3069 s<sup>-1</sup> 时，材料沿冲击方向被压缩且压缩程度不大，材料未发生断裂和失稳；当冲击平均应变速率增加至 6190 s<sup>-1</sup> 时，材料的压缩程度增加，观察到材料两侧发生 45°方向的断裂，材料发生了失稳现象；当冲击平均应变速率增加至 7449 s<sup>-1</sup> 时，材料沿 45°方向断裂，材料失稳严重；随着冲击平均应变速率继续增加至 7585 和 11337 s<sup>-1</sup>，材料被压缩破碎而失稳。



图 1 不同冲击平均应变速率下试样的宏观形貌  
(a) 3069 s<sup>-1</sup> (b) 6190 s<sup>-1</sup> (c) 7449 s<sup>-1</sup> (d) 7585 s<sup>-1</sup> (e) 11337 s<sup>-1</sup>  
Fig. 1 Macromorphologies of samples at different average impact strain rates

2.1 动态工程应力-工程应变曲线

图 2 为 Ti6242 钛合金在不同冲击载荷下的工程

应力-工程应变曲线。由图 2 可知，Ti6242 钛合金的动态工程应力随着工程应变的增加有所波动，随

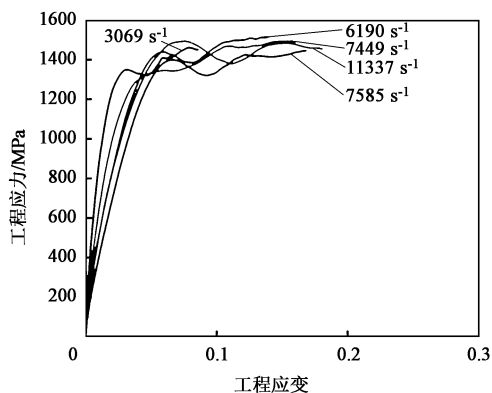


图 2 Ti6242 钛合金的工程应力-工程应变曲线

Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curves of Ti6242 titanium alloy

着冲击平均应变速率的变化不明显,说明动态工程

应力对冲击平均应变速率不敏感。随着冲击平均应变速率的增加, Ti6242 钛合金的塑性基本呈增加的趋势。

## 2.2 绝热剪切带

图 3 为 Ti6242 钛合金在不同冲击载荷下的绝热剪切带 (Adiabatic Shear Band, ASB) 形貌图。由图 3a 可知, 当冲击平均应变速率为  $3069 \text{ s}^{-1}$  时, Ti6242 钛合金内部的局部区域出现了微裂纹, 两条微裂纹之间形成了与冲击方向呈一定角度的细窄白色亮带。冲击载荷下材料会产生塑性功, 高百分比的塑性功进而转化为热量, 很大一部分热量来不及并很难散出去, 这在热力学上被认为是一个绝热的过程, 这部分热量将引起“绝热温升”, 促进绝热剪切带的形成与发展, 其主要特征是在材料内部形成具有“白亮”特征的白色亮带<sup>[18]</sup>。

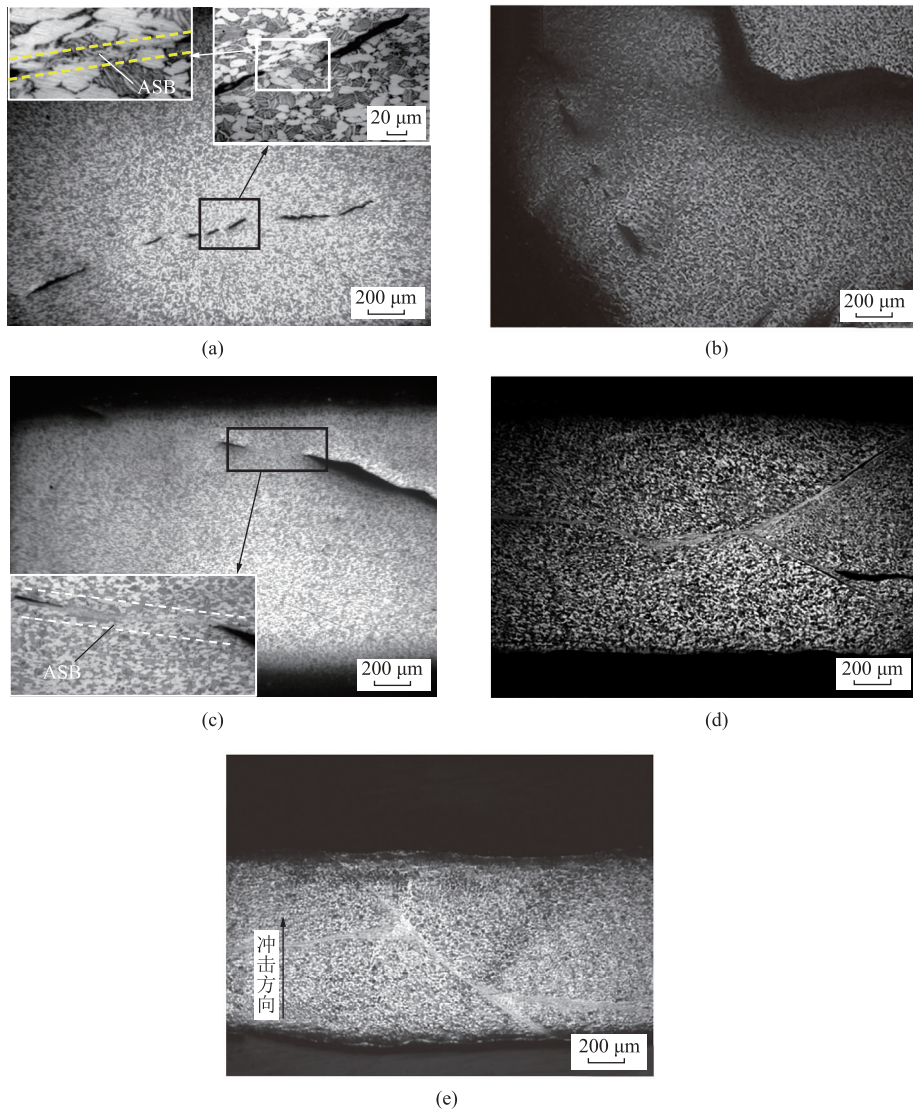


图 3 Ti6242 钛合金在不同冲击平均应变速率下的绝热剪切带形貌

(a)  $3069 \text{ s}^{-1}$  (b)  $6190 \text{ s}^{-1}$  (c)  $7449 \text{ s}^{-1}$  (d)  $7585 \text{ s}^{-1}$  (e)  $11337 \text{ s}^{-1}$

Fig. 3 Adiabatic shear band morphologies of Ti6242 titanium alloy under different average impact strain rates

由图 3b 可知, 当冲击平均应变速率为  $6190 \text{ s}^{-1}$  时, Ti6242 钛合金发生了断裂, 内部出现了贯穿的裂纹, 并且观察到微裂纹附近有“白亮”特征的绝热剪切带。由图 3c 可知, 当冲击平均应变速率为  $7449 \text{ s}^{-1}$  时, 可以观察到 Ti6242 钛合金内部出现了裂纹, 裂纹前端有一条清晰的与冲击方向呈一定角度的细小绝热剪切带, 其角度相比冲击平均应变速率为  $3056 \text{ s}^{-1}$  时有所增加; 由图 3d 可知, 当冲击平均应变速率为  $7585 \text{ s}^{-1}$  时, 可以观察到一条垂直于冲击方向的绝热剪切带、两条与冲击方向呈约  $45^\circ$  的绝热剪切带, 其中一条绝热剪切带的前端有明显裂纹。

由图 3e 可知, 当冲击平均应变速率为  $11337 \text{ s}^{-1}$  时, 形成了与冲击方向呈约  $45^\circ$  的绝热剪切带, 且

在扩展过程中两头出现了与冲击方向垂直的绝热剪切带。Yang Y 等<sup>[19-20]</sup>指出绝热剪切带行为与晶粒尺寸和沉淀相均有关。由目前的研究可知, 片层状分布的  $\alpha/\beta$  相具有阻碍绝热剪切带扩展的作用; 当冲击平均应变速率足够大 (具有足够高的冲击能量) 时, 绝热剪切带的扩展必能冲断这些晶界, 从而引起分叉现象<sup>[6]</sup>。随着冲击平均应变速率的增加, 绝热剪切带增多, 出现了与冲击方向垂直的分叉现象。

### 2.3 绝热剪切带内裂纹的形核和扩展

绝热剪切带的产生极易诱导裂纹的形核、长大和扩展, 最终材料发生失效<sup>[10-13]</sup>。图 4 为 Ti6242 钛合金不同冲击平均应变速率下的裂纹形貌图。由图 4a 和图 4c 可知, 当冲击平均应变速率为 3069 和

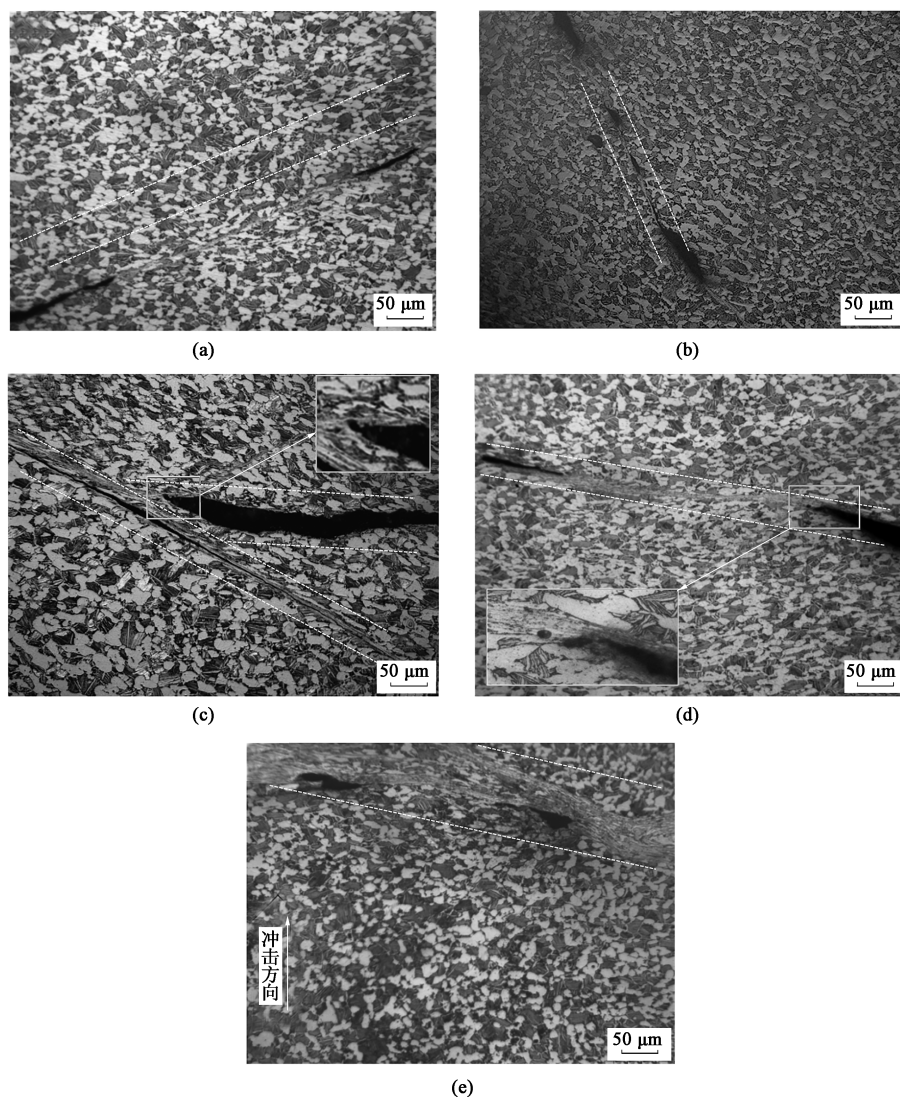


图 4 Ti6242 钛合金在不同冲击平均应变速率下的裂纹形貌

(a)  $3069 \text{ s}^{-1}$  (b)  $6190 \text{ s}^{-1}$  (c)  $7449 \text{ s}^{-1}$  (d)  $7585 \text{ s}^{-1}$  (e)  $11337 \text{ s}^{-1}$

Fig. 4 Crack morphologies of Ti6242 titanium alloy under different average impact strain rates

7449 s<sup>-1</sup> 时, 可以观察到 Ti6242 钛合金中形成了一条与冲击方向呈约 45°/135° 的绝热剪切带, 绝热剪切带的两端均有裂纹产生, 裂纹均在绝热剪切带内; 同时, 在裂纹的前端可以观察到孔洞, 该孔洞有与裂纹汇合成主裂纹的趋势。由图 4b 可知, 当冲击平均应变速率为 6190 s<sup>-1</sup> 时, 可以观察到 Ti6242 钛合金中形成了一条与冲击方向呈约 30° 的绝热剪切带, 绝热剪切带两端和绝热剪切带中段均产生了裂纹, 两端的裂纹有与中段裂纹汇合的趋势。由图 4d 可知, 当冲击平均应变速率为 7585 s<sup>-1</sup> 时, 也可以观察到一条与冲击方向呈约 45° 的绝热剪切带, 该绝热剪切带出现了分叉现象, 分叉的两条绝热剪切带均出现了裂纹。一条裂纹呈细长状, 出现在绝热剪切带内部; 另一条裂纹出现在分叉后的绝热剪切带尖端, 尺寸宽度较大, 其扩展的程度已经超过绝热剪切带的宽度。在裂纹前端可以观察到与一个孔洞汇合的形貌, 再往裂纹的前端还可观察到一个小的孔洞。由图 4e 可知, 当冲击平均应变速率为 11337 s<sup>-1</sup> 时, 可以观察到裂纹在绝热剪切带内部,

裂纹的形态较小。

图 5 为 Ti6242 钛合金在高速冲击载荷下的裂纹形核和扩展模型图。如图 5a 所示, 当绝热剪切带扩展时, 由于剪切应力的作用, 绝热剪切带内的组织产生了很大的应变, 其组织的均匀性和致密性出现了变化, 且绝热剪切带内存在温升, 这些均为孔洞的形核提供了条件, 导致孔洞在绝热剪切带内部形核。如图 5b 所示, 随着变形的进行, 由于切应力的作用以及卸载时形成的拉应力作用, 微孔洞将长大并沿绝热剪切带的方向扩展; 微孔洞形核初期, 其形状为圆形或者椭圆形, 由于存在剪切应力, 微孔洞在沿剪切带宽度方向长大的同时, 并沿绝热剪切带的扩展方向被拉长为椭圆, 然后进一步与前端的孔洞合并形成微裂纹。如图 5c 所示, 随着变形的继续, 微裂纹进一步与前端孔洞合并扩展延伸, 最终形成宏观裂纹。因此, Ti6242 钛合金在高速冲击载荷作用下, 孔洞在绝热剪切带内形核, 并且以孔洞的形核和合并形成微裂纹, 微裂纹与前端的孔洞合并继续扩展而形成宏观裂纹。

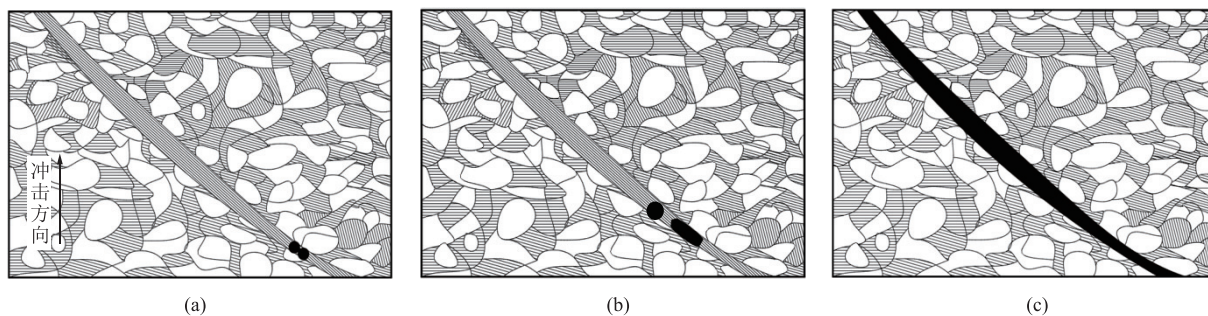


图 5 裂纹形核和扩展模型图

(a) 孔洞 (b) 微裂纹 (c) 宏观裂纹

Fig. 5 Model diagrams of crack nucleation and propagation

(a) Void (b) Micro-crack (c) Macro-crack

### 3 结语

本文通过研究 Ti6242 钛合金在高速冲击载荷下的绝热剪切行为和裂纹扩展机理, 发现 Ti6242 钛合金的抗冲击强度对冲击平均应变速率不敏感, 塑性随着冲击平均应变速率的增加呈增加趋势, 在低的冲击平均应变速率下材料不发生断裂失稳, 随着冲击平均应变速率的增加, 材料失稳严重并发生明显的断裂失效; 绝热剪切带数量随冲击平均应变速率的增加而增加, 层状分布的  $\alpha/\beta$  相具有阻碍绝热剪

切带扩展的作用, 引起绝热剪切带分叉并出现了与冲击方向垂直的分叉现象; 孔洞在绝热剪切带内形核、长大、合并, 最终导致微裂纹的形成, 微裂纹通过与前端孔洞合并继续扩展为宏观裂纹, 导致材料断裂失效。

层状  $\alpha/\beta$  相是 Ti6242 钛合金成形制造过程中需关注的主要问题, 有助于服役过程中抑制绝热剪切带的扩展和裂纹的形成, 提高其抗冲击性能, 为指导生产和提高该材料的使用范围提供理论依据。

参考文献:

[1] Rezaee M, Zarei-Hanzaki A, Mohamadizadeh A, et al. High-tem-

- perature flow characterization and microstructural evolution of Ti6242 alloy: Yield drop phenomenon [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 673: 346–354.
- [2] Echlin M, Stinville J C, Miller V M, et al. Incipient slip and long range plastic strain localization in microtextured Ti-6Al-4V titanium [J]. *Acta Materialia*, 2016, 114: 164–175.
- [3] Xavier Boyat, Dorick Ballat-Durand, Julie Marteau, et al. Interfacial characteristics and cohesion mechanisms of linear friction welded dissimilar titanium alloys: Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti17) and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti6242) [J]. *Materials Characterization*, 2019, 158: 109942.
- [4] Xi G Q, Lei J F, Q J K, et al. A semi-quantitative explanation of the cold dwell effect in titanium alloys [J]. *Materials & Design*, 2020, 194: 108909.
- [5] 张磊, 胡时胜, 吴家俊.  $\alpha$ -钛合金 TA6 的动态力学性能和剪切现象分析 [J]. *实验力学*, 2005, 20 (4): 567–572.
- Zhang L, Hu S S, Wu J J. Analysis of adiabatic shearing phenomenon and dynamic mechanical performance on TA-6 of  $\alpha$ -titanium alloy [J]. *Experimental Mechanics*, 2005, 20 (4): 567–572.
- [6] 孙坤, 程兴旺, 王富耻, 等. 组织及应变速率对 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): 1856–1860.
- Sun K, Cheng X W, Wang F C, et al. Study on sensitivity of adiabatic shear of TC6 alloy under different strain rate and morphology [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37 (10): 1856–1860.
- [7] Yang Y, Li X M, Tong X L, et al. Effects of microstructure on the adiabatic shearing behaviors of titanium alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528 (7–8): 3130–3133.
- [8] 周琳, 刘运玺, 陈玮, 等. Ti-4Al-5Mo-6Cr-5V-1Nb 合金的热变形行为及热加工图 [J]. *稀有金属*, 2022, 46 (1): 27–35.
- Zhou L, Lin Y X, Chen W, et al. Thermal deformation behavior and processing map of Ti-4Al-5Mo-6Cr-5V-1Nb alloy [J]. *Chinese of Rare Metal*, 2022, 46 (1): 27–35.
- [9] 彭美旗, 程兴旺, 郑超, 等. 次生片层  $\alpha$  相宽度对双态组织 TC4 钛合金动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46 (7): 1843–1849.
- Peng M Q, Cheng X W, Zheng C, et al. Effects of secondary  $\alpha$  phase width on dynamic mechanical properties and sensitivity of adiabatic shear banding in bimodal microstructures of TC4 alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46 (7): 1843–1849.
- [10] 毛萍莉, 刘超, 刘正, 等. AZ31 镁合金中绝热剪切带的组织演变规律 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44 (5): 1181–1184.
- Mao P L, Liu C, Liu Z, et al. Microstructure evolution of adiabatic shear bands in AZ31 magnesium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44 (5): 1181–1184.
- [11] Mendoza I, Villalobos D, Alexandrov B T. Crack propagation of Ti alloy via adiabatic shear bands [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 645: 306–310.
- [12] Liu X, Zhou Y, Zhu X J, et al. The failure mechanism at adiabatic shear bands of titanium alloy: High-precision survey using precession electron diffraction and geometrically necessary dislocation density calculation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 746: 322–331.
- [13] Zhou S, Deng C, Liu S, et al. Microstructure, texture, and fracture of pure magnesium adiabatic shear band under high strain rate compression [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 822: 141632.
- [14] 张明达, 曹京霞, 隋楠, 等. 高载荷作用下 Ti6242 钛合金低周疲劳和保载疲劳损伤行为分析 [J]. *航空材料学报*, 2019, 39 (1): 55–61.
- Zhang M D, Cao J X, Sui N, et al. Fracture behavior of low cycle fatigue and dwell fatigue of Ti6242 titanium alloy under high load [J]. *Aeronautical Materials*, 2019, 39 (1): 55–61.
- [15] 张明达, 曹京霞, 翟战江, 等. 保载时间和应力比对 Ti6242 合金应力应变响应影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32 (6): 1685–1694.
- Zhang M D, Cao J X, Zhai Z J, et al. Effects of dwell time and stress ratio on the stress and strain responses of Ti6242 alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32 (6): 1685–1694.
- [16] 李宏辉, 王柯, 辛仁龙, 等. 双态组织 TA19 钛合金高温变形过程中的微观组织演变机制 [J]. *材料热处理学报*, 2020, 41 (8): 27–34.
- Li H H, Wang K, Xin R L, et al. Microstructure evolution mechanism of TA19 titanium alloy with bi-modal structure during high temperature deformation [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41 (8): 27–34.
- [17] 梁运兴, 王龙祥, 魏志坚, 等. 热变形对 TA19 闪光焊接组织均匀化的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49 (5): 1757–1756.
- Liang Y X, Wang L X, Wei Z J, et al. Effect of hot deformation on microstructure homogenization of flash welded TA19 alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49 (5): 1757–1756.
- [18] Furuhashi T, Maki T. Variant selection in heterogeneous nucleation on defects in diffusional phase transformation and precipitation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 312 (1–2): 145–154.
- [19] Yang Y, Jiang L H. Effect of heat treatment on adiabatic shear susceptibility in ZK60 magnesium alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 664: 146–154.
- [20] Yang Y, Jiang L H, Xu Z, et al. An examination of adiabatic shearing behavior in ZK60 alloy with different states of heat treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 685: 57–64.