

Ti6321 钛合金动态断裂行为研究

李严星¹, 周哲¹, 王琳^{1,2,3}, 程焕武^{1,2}, 程兴旺^{1,2}

(1. 北京理工大学材料学院, 北京 100081)

(2. 冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081)

(3. 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 对 Ti6321 钛合金进行动态三点弯曲加载, 使其发生 I 型 (张开型) 断裂并获得波形曲线, 结合实验-数值法获得了 3 种组织 Ti6321 钛合金的 I 型裂纹动态断裂性能。利用扫描电镜、激光共聚焦显微镜对 3 种组织 Ti6321 钛合金的断口进行观察分析。结果表明, 魏氏组织具有最高的 I 型裂纹动态断裂性能, 双态组织次之, 等轴组织的动态断裂性能最低。对于 I 型裂纹断口, 等轴组织与双态组织主要为韧性断裂机制, 而魏氏组织呈现出部分解理断裂的特征。魏氏组织断口的起伏最大, 比表面积最大, 裂纹扩展需要消耗更多能量, 因此断裂性能较好。

关键词: Ti6321 钛合金; 动态断裂; I 型裂纹; 断裂特征

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)03-0953-06

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀、耐高低温性能好等优点, 在航空、航天、海洋、石油等领域有广泛的应用^[1-3]。钛合金作为结构件材料需要经常承受冲击载荷的作用^[4], 通常情况下, 材料内部难免会出现裂纹或者其他缺陷, 在使用过程中受到载荷作用后容易因缺陷发生断裂破坏^[5-6]。

断裂韧性是表示材料韧性的指标, 反映材料对裂纹和其他尖锐缺陷扩展的抵抗能力, 是评价材料在冲击载荷作用下承载能力的一个重要参数^[7-8]。由于载荷类型的差异及存在的应变率效应与惯性效应, 准静态载荷下材料的断裂性能测试方法与断裂机制不再适用, 因此建立动态载荷下钛合金的动态断裂性能测试方法及研究其在高应变率下的断裂特征对于常用作结构材料的钛合金来说是非常有意义的。

目前国内外对不同组织钛合金的裂纹扩展和断裂韧性开展了部分研究, Christophe 和 Shi^[9-11]等人发现, 层状微观结构的断裂能高于等轴微观结构的断裂能, 微观结构中长而厚的 α 片层可以明显提高抗断裂性。Ren^[12-13]等采用紧凑拉伸试样研究了 Ti6321 钛合金的微观结构对疲劳裂纹扩展速率的影响。结果表明, 层状结构的裂纹扩展速率比双态结构慢, 尤其是在裂纹扩展的早期更加明显。但目前对于 Ti6321 合金动态断裂的演化过程和特征缺乏相应的认识。

Ti6321 钛合金是我国自主研发的一种新型 Ti-Al-

Nb-Zr-Mo 系近 α 型钛合金, 除了传统钛合金的优点外, Ti6321 钛合金还具有高强、可焊的特点, 作为结构件材料在海洋领域有着广泛的应用, 常用于高压容器、深潜器的耐压壳体等^[14-16]。本研究通过动态三点弯曲试验, 结合实验-数值法对 Ti6321 钛合金 3 种组织 I 型裂纹动态断裂性能进行了研究, 并利用扫描电镜与激光共聚焦显微镜对其断口进行观察分析, 比较了 Ti6321 钛合金 3 种组织 I 型裂纹动态断裂特征之间的差异。

1 实验

使用的 Ti6321 钛合金的成分如表 1 所示。利用差示扫描量热仪 (DSC) 测得合金的相变点为 970 °C。采用表 2 所示热处理制度对合金进行热处理, 得到典型的等轴组织、双态组织、魏氏组织。

在本研究中, 利用改进后的霍普金森杆装置对试样加载, 采用 I 型裂纹动态断裂韧性试验装置测试试样的动态断裂韧性。其中入射杆材料为 55CrSi, 直径为 $\Phi 16$ mm, 总长为 1000 mm, 入射杆端头倒角半径为 2 mm, 端头圆弧切线与杆轴向夹角为 120°。入射波信号由粘贴在入射杆中间部位的应变片监测, 该应变片型号为 BE120-2AA, 灵敏度系数为 2.08。试样上监测起裂时间的应变片型号为 ZA120-05AA-A, 灵敏度系数为 1.76。

动态三点弯曲试样形状与准静态下三点弯曲试样类似, 根据实验室霍普金森杆装置, 设计试样尺寸如图 1 所

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室基金 (YBKT17-06)

作者简介: 李严星, 男, 1996 年生, 硕士生, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, 电话: 010-68912709, E-mail: 1322174159@qq.com

表 1 Ti6321 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti6321 titanium alloy (wt%)

Al	Nb	Zr	Mo	Ti
6.0	3.0	2.0	1.0	Bal.

表 2 热处理制度及组织状态

Table 2 Heat treatment and microstructure

Heat treatment process	Microstructure
800 °C/1 h, AC	Equiaxed structure
960 °C/1 h, AC	Bimodal structure
1030 °C/1 h, AC	Widmanstatten structure

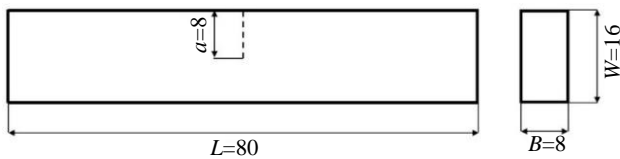


图 1 试样尺寸

Fig.1 Size of the sample (mm)

示，其中长度 $L=80$ mm，跨距 $S=64$ mm，宽度 $W=16$ mm，厚度 $B=8$ mm，采用直径 $\Phi 0.12$ mm 的钼丝在试样中心部分进行线切割，作为预制裂纹，预制裂纹长度为 $a=8$ mm。

本研究利用 ABAQUS 有限元分析软件，建立与 I 型裂纹动态断裂韧性试验装置、试样尺寸相同的三维模型，如图 2 所示。选择 Johnson-Cook 本构模型来描述 Ti6321 钛合金的塑性本构关系。对裂尖处网格进行加密处理，以保证计算的精确性。

通过入射杆上粘贴的应变片采集入射波、反射波信号，根据一维应力波理论计算入射杆中应力，作为有限元分析软件中的输入，输入到相应的三维模型中，根据

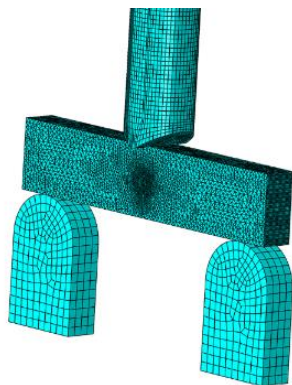


图 2 I 型裂纹动态断裂韧性试验三维模型

Fig.2 Three dimensional experimental model of dynamic fracture toughness of mode I crack

有限元分析结果中试样的裂尖张开位移计算应力强度因子-时间曲线 $K_d(t)$ ，三点弯曲试样上有应变片可以监测裂纹的起裂时间 t_f ，从而可以获得材料 I 型动态断裂韧性。

采用 Zeiss Supra55 扫描电镜观察 3 种组织 Ti6321 钛合金在 I 型裂纹下的断裂特征，采用激光共聚焦显微镜对断口的三维形貌进行分析。结合数值计算和断口分析结果，探究不同组织 Ti6321 钛合金的动态断裂损伤规律。

2 结果与分析

通过实验-数值法计算 Ti6321 钛合金 3 种组织的 I 型裂纹动态断裂韧性结果如表 3 所示。由表 3 可知，在加载气压相近的情况下，等轴组织、双态组织、魏氏组织的平均动态断裂韧性分别为 228.27、300.79、442.49 $\text{MPa m}^{1/2}$ ，魏氏组织的动态断裂韧性最高，双态组织次之，等轴组织最差，这表明在 I 型裂纹条件下，魏氏组织具有最好的抵抗裂纹开裂的性能。

使用激光共聚焦显微镜对断口进行三维拍摄，选取多个视场，获得的典型 Ti6321 钛合金 3 种组织断口的二维形貌如图 3 所示。

断口的表面实际上由许多微小的断面组成，其大小、高度差决定了断口的粗糙度。根据拍摄过程中放大倍数的不同拍摄区域由不同个数的像素组成，每个像素包含着该点的 X、Y、Z 坐标以及光强和颜色值，根据每个像素点的信息可对断口进行灰色或彩色的二维或者三维重构，因此可以对断口表面的高度分布、表面积及粗糙度进行观察与测量。等轴组织的各个断面整体尺寸都较小，断面高度也都比较相近，因此断口较为均匀，没有明显的起伏。相较于等轴组织，双态组织的断口起伏明显增加，断面的大小也不均匀，部分断面之间存在明显的高度差。魏氏组织断口表面更加不均匀，有明显的凸起与凹痕，起伏最大。

表 3 I 型动态断裂韧性测试结果

Table 3 Dynamic fracture toughness test results of mode I crack

Structure	Pressure/MPa	Crack initiation time/ μs	Fracture toughness, $K_{ID}/\text{MPa m}^{1/2}$	K_{ID} (average value)/ $\text{MPa m}^{1/2}$
Equiaxed structure	0.55	49	220.51	228.27
		52	236.18	
		52	228.17	
Bimodal structure	0.55	54	281.72	300.79
		60	320.24	
		60	311.41	
Widmanstatten structure	0.55	63	418.80	442.49
		68	450.56	
		69	458.10	

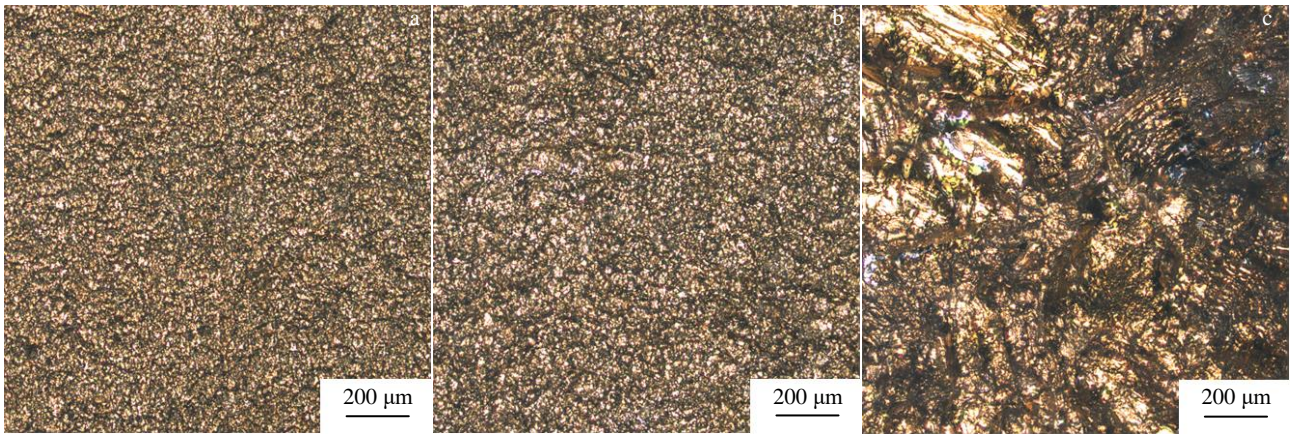


图3 Ti6321 钛合金断口的激光扫描二维照片

Fig.3 Laser scanned 2D images of the fracture of Ti6321 titanium alloy: (a) equiaxed structure, (b) bimodal structure, and (c) Widmanstatten structure

将二维形貌转化为三维形貌,进行噪声处理后,获得的3种组织断面的三维形貌及具体高度分布如图4所示,三维形貌可以更好地展示断面的起伏情况。从图4中可以看出,等轴组织的断面高度分布最为均匀,起伏较小,高度范围仅有200 μm左右,双态组织次之,魏氏组织断口表面的起伏较大,高低分明,高度差接近500 μm。

断裂表面形貌可以用许多不同的定量参数来描述,表面定量表征的最常见方法是测量断面的表面积及比表面积。根据激光共聚焦显微镜提供断面的表面高度的三维地形图。可以测量相应断裂表面的真实表面积 S ,

并除以其在平面上的投影面积 A ,以计算其比表面积值,测量过程中选取不同倍数下、多个视场进行计算以保证准确性,具体结果如表4所示。由表4可知,魏氏组织的比表面积最大,约为2.136,双态组织与等轴组织较为接近,分别为1.467与1.328。一定程度上,比表面积可以反映断口的粗糙程度,比面积越大,说明断口越粗糙,这与断口的高度分布和SEM下拍摄的宏观断口呈现出相同的规律。较大的比表面积说明断裂过程中裂纹扩展路径更加曲折,裂纹的总长度越长,需要的能量就越大,因此断裂韧性就越高^[17-18]。

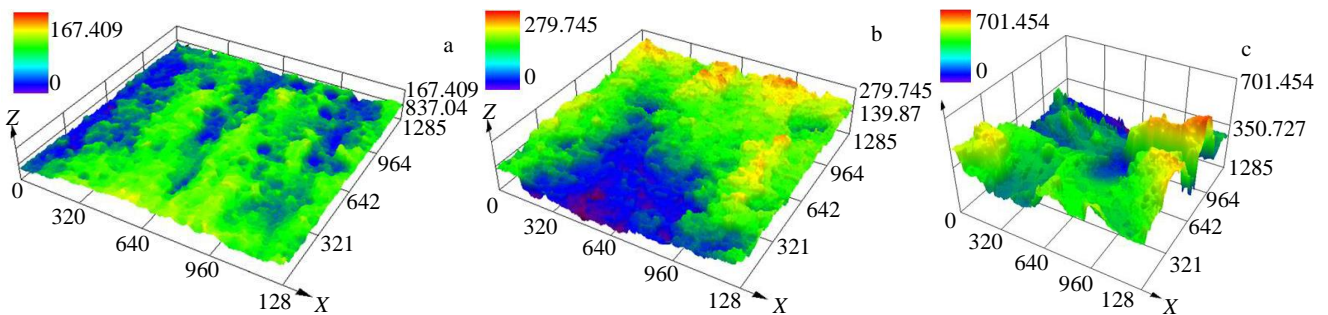


图4 Ti6321 钛合金3种组织断口高度分布

Fig.4 Fracture height distribution of three structures of Ti6321 titanium alloy: (a) equiaxed structure, (b) bimodal structure, and (c) Widmanstatten structure

表4 3种组织Ti6321 钛合金断面平均比表面积

Table 4 Average specific surface area of section of Ti6321 titanium alloy with three structures

Structure	Average specific surface area
Equiaxed structure	1.328
Bimodal structure	1.467
Widmanstatten structure	2.136

图5为Ti6321 钛合金I型裂纹断口的宏观形貌,断口都是由两侧的剪切唇与中间的裂纹扩展区组成。在断裂过程中,裂纹在试样中心区域向外扩展,裂纹外侧的整个区域都发生了较大的塑性变形,形成了剪切唇,3种组织中的剪切唇都为弧形。其中等轴组织与双态组织的宏观断口较为相似,断口两侧的剪切唇表面较为光滑,而魏氏组织断口中的剪切唇表面存在明显起伏,面积有所减小。

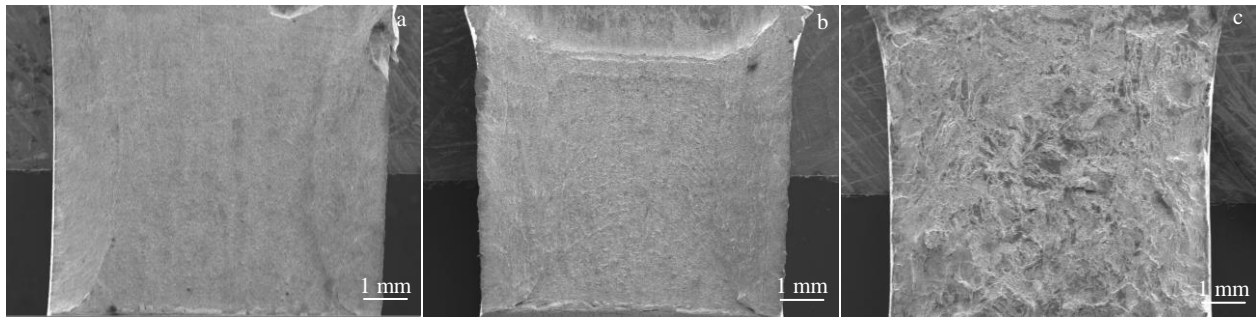


图 5 Ti6321 钛合金 I 型裂纹断口宏观形貌

Fig.5 Macroscopic fracture morphologies of mode I crack of Ti6321 titanium alloy: (a) equiaxed structure, (b) bimodal structure, and (c) Widmanstatten structure

图 6 是 Ti6321 钛合金断口微观组织。可以看出，发生动态断裂后，断口周围的组织未发生明显的变化，组织内部未发生绝热剪切现象。3 种组织发生动态断裂后，等轴组织试样裂纹扩展路径的最大起伏高度差 15.6 μm ，双态组织和魏氏组织的分别为 32.4、73.8 μm 。同样说明，片层的魏氏组织的裂纹扩展路径更加曲折，在动态断裂过程中需要消耗更多的能量。

等轴组织与双态组织中间的裂纹扩展区域较为平直，其中等轴组织的断面更加平坦，因此裂纹在扩展过程中对能量的需求较小。双态组织的断面存在一些比较浅的沟壑，断裂表面上较小的波动说明双态组织中裂纹发生了较小的偏转，因此对能量的需求高于等轴组织。而魏氏组织断口的中间裂纹扩展区域较为粗糙，有明显的起伏且沟壑幅度较大，这可能与原始 β 晶粒的不同取向有关。并且魏氏组织断口存在许多具有金属光泽的小尺寸断面，断裂表面上较高的波动深度表明裂纹路径的大偏转，这表明裂纹扩展期间产生了更长的路径，需要较高的断裂能量，因此魏氏组织的断裂性能最好。

图 7a~7c 分别为等轴组织断口在不同放大倍数下的照片，图 7a、7b 分别为断口表面覆盖着致密的等轴韧窝，

并沿裂纹扩展方向分有一些撕裂棱的存在，韧窝直径为 10~15 μm ，与等轴初生 α 相的晶粒尺寸相当，韧窝的形貌和尺寸表明裂纹在扩展的过程中受到了初生 α 相的强烈影响。此外在韧窝的周围发现了显微孔洞以及少量较浅的二次裂纹，如图 7c 所示。

图 7d~7f 为双态组织断口在不同放大倍数下的照片，断口表面同样覆盖着致密的韧窝，但与等轴组织相比，双态组织中韧窝较深并且撕裂棱的起伏也比较大，如图 7d、7e 所示，韧窝旁边的撕裂棱代表着裂纹扩展时的取向，因此较长及起伏大的撕裂棱代表着裂纹扩展时更加曲折，意味着材料的韧性越大。图 7f 为双态组织中的微孔洞与二次裂纹，二次裂纹数量与深度较等轴组织相比均有增加。

图 8 为魏氏组织断口在高放大倍数下的照片。可以观察到断口存在许多解理平面，这些解理面都是随机分布，解理平面内存在一些河流花样，平面周围有许多细小的韧窝，韧窝较浅，如图 8a、8b 所示，表明在这种条件下合金的断裂模式是韧性和脆性模式的组合。魏氏组织的断裂表面上存在大量尺寸较大的二次裂纹 8c、8d，二次裂纹的产生需要耗散额外的能量，增加了材料的断裂韧性。

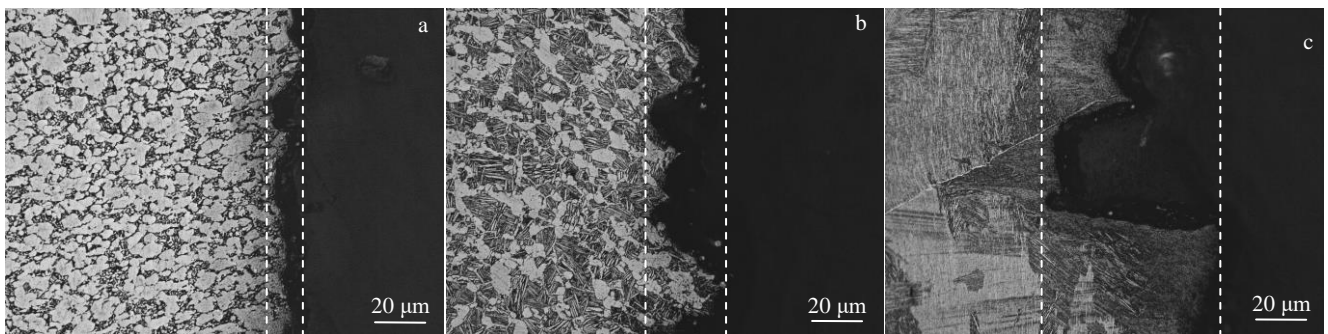


图 6 Ti6321 钛合金断口微观组织

Fig.6 Microstructures of fracture of Ti6321 titanium alloy: (a) equiaxed structure, (b) bimodal structure, and (c) Widmanstatten structure

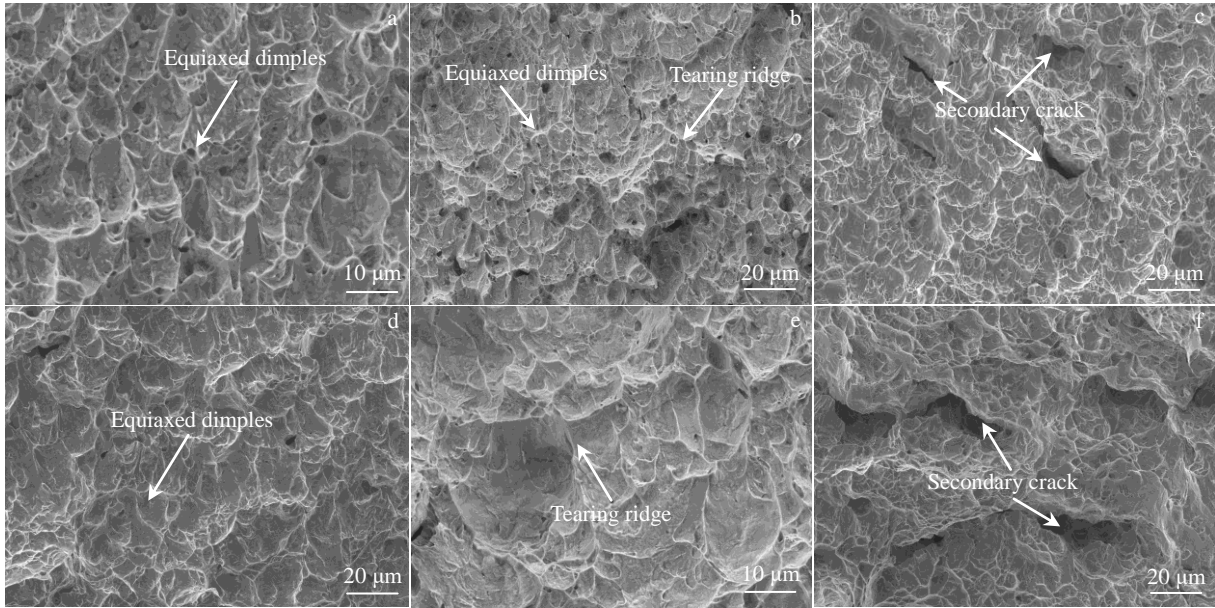


图 7 等轴组织和双态组织 Ti6321 钛合金 I 型裂纹微观断口形貌

Fig.7 Microscopic fracture morphologies of mode I crack of Ti6321 titanium alloy with equiaxed structure (a-c) and bimodal structure (d-f): (a) equiaxed dimple, (b) equiaxed dimple and tearing edge, (c) secondary crack, (d) equiaxed dimple, (e) tearing edge, and (f) secondary crack

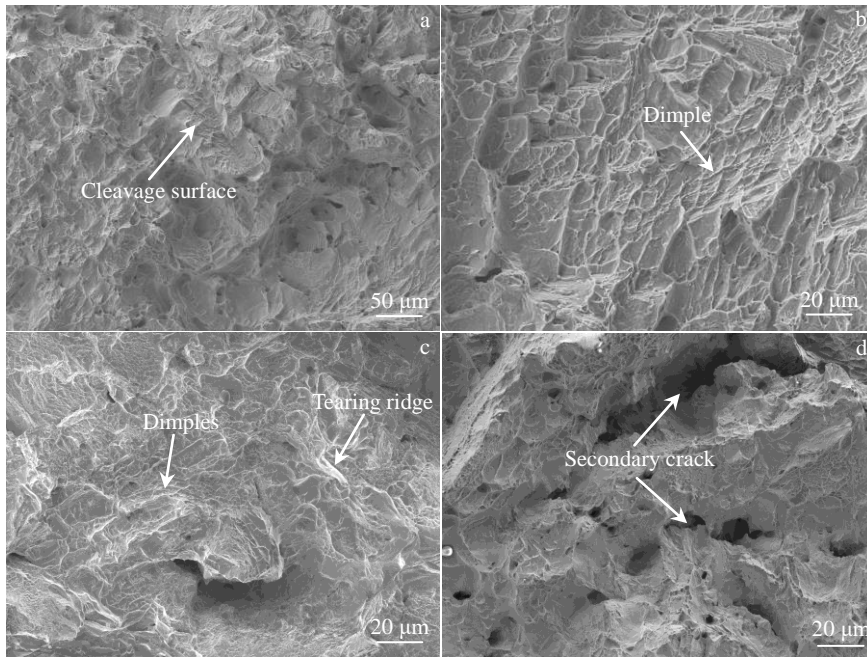


图 8 魏氏组织 Ti6321 钛合金 I 型裂纹微观断口形貌

Fig.8 Microscopic fracture morphologies of mode I crack of Ti6321 titanium alloy with Widmanstatten structure: (a) cleavage surface, (b) dimples on cleavage plane, (c) dimple and tearing edge, and (d) secondary crack

3 结 论

1) 实验-数值法测得 3 种组织 Ti6321 钛合金的 I 型裂纹动态断裂韧性分别为 228.27、300.79、

442.49 MPa m^{1/2}, 即 3 种组织中魏氏组织的动态断裂韧性最高, 双态组织次之, 等轴组织的动态断裂韧性最低。

2) 在 I 型裂纹断裂条件下, 3 种组织断口宏观上都是由剪切唇与裂纹扩展区组成。断口微观上等轴组织与

双态组织主要是以大小不一的韧窝为主, 呈韧性断裂; 魏氏组织中出现解理面和较多的二次裂纹, 带有部分解理断裂特征。

3) 等轴组织的断口最平坦, 比表面积最小; 双态组织居中; 魏氏组织断口的起伏最大, 比表面积最大, 裂纹扩展需要消耗更多能量, 因此断裂性能较好。

参考文献 References

- [1] Zhao Yongqing(赵永庆). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2010, 29(5): 1
- [2] Yu Yu(于 宇), Li Jiaqi(李嘉琪). *Materials Development and Application*(材料开发与应用)[J], 2018, 33(3): 111
- [3] Xiong J H, Li S K, Gao F Y *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 640: 419
- [4] Xu Xuefeng(徐雪峰), Wang Lin(王 琳), Cheng Xingwang(程兴旺) *et al. Acta Armamentarii* (兵工学报)[J], 2020, 41(7): 1401
- [5] Kumar R S. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 2021, 248: 107 699
- [6] Coules H E. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*[J], 2018, 162: 98
- [7] Fu Yanyan(付艳艳), Song Yueqing(宋月清), Hui Songxiao(惠松晓) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(1): 92
- [8] Liu Y, Lim S C V, Chen D *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 97: 101
- [9] Christophe B, Julitte H, Nathalie G *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 618: 546
- [10] Shi X H, Zeng W D, Zhao Q Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 636: 543
- [11] Shi X H, Zeng W D, Shi C L *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 632: 748
- [12] Ren J Q, Wang Q, Zhang B B *et al. Intermetallics*[J], 2021, 130: 107 058
- [13] Wang Q, Ren J Q, Wu Y K *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 789: 249
- [14] Zhou D D, Zeng W D, Xu J W *et al. Materials Characterization*[J], 2019, 151: 103
- [15] Yang Yingli(杨英丽), Su Hangbiao(苏航标), Guo Dizi(郭荻子) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20: 1002
- [16] Ning Zixuan(宁子轩), Wang Lin(王 琳), Cheng Xingwang(程兴旺) *et al. Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 2021, 42(4): 862
- [17] Hall I W, Hammond C. *Materials Science and Engineering A*[J], 1978, 32(3): 241
- [18] Niinomi M, Kobayashi T, Sasaki N. *Materials Science and Engineering A*[J], 1988, 100: 45

Research on Dynamic Fracture Behavior of Ti6321 Titanium Alloy

Li Yanxing¹, Zhou Zhe¹, Wang Lin^{1,2,3}, Cheng Huanwu^{1,2}, Cheng Xingwang^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. National Key Laboratory of Science and Technology on Materials in Impact Environment, Beijing 100081, China)

(3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The dynamic three-point bending loading was carried out on Ti6321 titanium alloy to cause mode I (open type) fracture and obtain the waveform curve. Combined with the experimental & numerical method, the mode I crack dynamic fracture properties of Ti6321 titanium alloy with three structures were obtained. The fracture surface morphologies of three kinds of Ti6321 titanium alloys were observed and analyzed by SEM and confocal laser scanning microscope (CLSM). The results show that the Widmanstatten structure has the highest dynamic fracture performance of mode I crack, followed by the bimodal structure, and the equiaxed structure has the lowest dynamic fracture performance. For mode I crack fracture, equiaxed structure and bimodal structure are mainly ductile fracture mechanism, while Widmanstatten structure has the characteristics of partial cleavage fracture. The Widmanstatten structure has the best fracture performance. Because of the largest fluctuation of fracture and the largest specific surface area, the crack propagation needs more energy.

Key words: Ti6321 titanium alloy; dynamic fracture; mode I crack; fracture characteristics

Corresponding author: Wang Lin, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68912709, E-mail: linwang@bit.edu.cn