

不同组织 Ti6321 合金的绝热剪切行为研究

李严星¹, 王琳^{1,2,3}, 闫志维¹, 周哲¹, 宁子轩¹, 刘安晋¹

(1. 北京理工大学, 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: 通过热处理获得等轴组织、双态组织和魏氏组织的 Ti6321 合金, 研究不同组织的 Ti6321 合金在动态压缩下的绝热剪切行为。利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 试验装置对帽形试样进行强迫剪切加载, 结合扫描电子显微镜和金相显微镜, 对其绝热剪切带和微观组织演化进行观察和分析。结果表明: Ti6321 合金的绝热剪切敏感性与其组织密切相关, 魏氏组织具有最高的绝热剪切敏感性, 等轴组织与双态组织的绝热剪切敏感性接近。随着热处理温度的升高, 双态组织的 Ti6321 合金初生 α 相含量降低, 绝热剪切敏感性增大。冲击速度也会对 Ti6321 合金的绝热剪切行为产生较大影响, 随着冲击速度提高, 其绝热剪切敏感性提高。

关键词: 钛合金; 热处理; 微观组织; 绝热剪切敏感性

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)06-012-06

Research on Adiabatic Shear Behavior of Ti6321 Alloy with Different Microstructures

Li Yanxing¹, Wang Lin^{1,2,3}, Yan Zhiwei¹, Zhou Zhe¹, Ning Zixuan¹, Liu Anjin¹

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

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

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

Abstract: Ti6321 alloy with different microstructures were obtained by different heat treatments, which include equiaxed microstructure, bimodal microstructure and widmanstatten microstructure. The adiabatic shear behavior of Ti6321 alloy under dynamic compression was studied. The specimens were subjected to forced shear loading by a split Hopkinson pressure bar (SHPB) test device. The adiabatic shear band and microstructure evolution of the specimens were observed and analyzed by scanning electron microscope and metallographic microscopy. The results show that the adiabatic shear sensitivity of Ti6321 alloy is closely related to the microstructure. Ti6321 alloy with widmanstatten microstructure has the highest adiabatic shear sensitivity, and the adiabatic shear sensitivity of the equiaxed microstructure is close to that of the bimodal microstructure. For the bimodal microstructure, the content of primary α phase decreases and the adiabatic shear sensitivity increases with the increase of heat treatment temperature. The impact velocity also has a large effect on the adiabatic shear behavior of Ti6321 alloy, and the adiabatic shear sensitivity increases as the impact velocity increases.

Key words: titanium alloy; heat treatment; microstructure; adiabatic shear sensitivity

钛合金具有密度小、比强度高、组织稳定性好等优点, 被广泛应用于船舶和航空工业等领域^[1-3]。

作为结构件材料, 钛合金在使用过程中经常会受到冲击载荷的作用^[4,5]。绝热剪切是材料在冲击载荷作用下的一个重要现象, 普遍存在于高速冲击、侵彻、高速成形、冲蚀等高速变形过程中^[6-9]。从热力学角度来说, 高速冲击载荷作用下材料变形塑性功转化成热能, 大量热能短时间难以疏散将引起绝热升

收稿日期: 2021-05-22

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目 (YBKT-17-06)

通信作者: 王琳(1971—), 女, 副教授。

温, 导致热塑性失稳, 从而引起绝热剪切带 (adiabatic shear band) 的形成和扩展^[10]。在绝热剪切带内可产生应变率高达 $10^5 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ 的剪切应变, 温升达到 $10^2 \sim 10^3 \text{ K}$ ^[5]。

钛及钛合金具有比较低的比热容和热导率, 是一种绝热剪切敏感性较高的材料^[8,11]。关于钛及钛合金的绝热剪切敏感性, 国内外已经进行了大量研究。董新龙等^[11]采用分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 技术对圆柱形 TA2 纯钛试样的绝热剪切破坏特性进行了研究, 发现动态压缩后试样中产生了对称的双圆锥形剪切带。王丁等^[12]对圆柱形、帽形 TB2 钛合金试样进行了室温动态压缩实验。结果表明, β 单相组织的 TB2 钛合金试样绝热剪切敏感性较高; 双相组织的绝热剪切敏感性较低, 承载能力更强。付应乾等^[13]以扁平闭合帽形 TA2 纯钛试样为研究对象, 研究了准静态和动态加载下试样绝热剪切的破坏特征和力学响应行为。研究发现, 准静态加载下, 剪切变形区始终保持一定宽度; 而动态加载下, 剪切变形区的宽度逐渐减小, 直至高度局部化的绝热剪切带形成, 且其剪切区宽度明显小于准静态加载。

Ti6321 合金是上海钢铁研究所于 20 世纪 80 年代研制的一种新型中强高韧近 α 钛合金, 除了具有密度小、强度高、无磁性等优良性能外, 还具有高的冲击韧性和断裂韧性^[14-16]。目前, 关于 Ti6321 合金的研究多集中于热处理对其力学性能的影响, 而关于合金中相含量和分布对其绝热剪切敏感性的影响鲜有报道。本研究通过不同热处理工艺得到等轴组织、双态组织和魏氏组织的 Ti6321 合金, 利用 SHPB 作为加载装置, 研究不同组织的 Ti6321 合金的绝热剪切行为, 以期掌握 Ti6321 合金在动态载荷下的服役性能。

1 实验

实验对象为 Ti6321 合金, 名义成分为 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo, 利用升温金相法测得其 ($\alpha + \beta$)/ β 相变点为 $990 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 。Ti6321 合金经过表 1 所示 4 种工艺热处理后, 获得显微组织不同的 4 组试样, 分别编号为 EM、BM1、BM2 和 WM。

图 1 为 Ti6321 合金经不同工艺热处理后的微观组织。试样经 $800 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$ 热处理后, 组织中晶粒分布均匀, 为等轴组织 (图 1a)。热处理温度为 960、

表 1 Ti6321 合金的热处理工艺

Table 1 Heat treatment processes of Ti6321 alloy

Specimen	Heat treatment process
EM	$800 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$
BM1	$960 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$
BM2	$980 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$
WM	$1030 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$

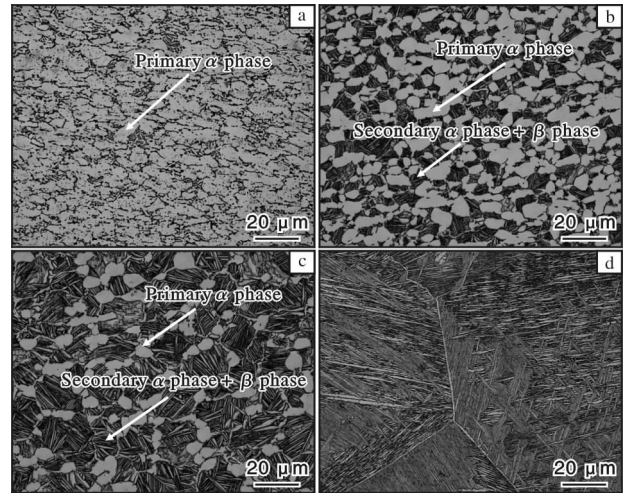


图 1 Ti6321 合金经不同工艺热处理后的微观组织

Fig. 1 Microstructures of Ti6321 alloy heat treated by different processes: (a) $800 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$; (b) $960 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$; (c) $980 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$; (d) $1000 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}/\text{AC}$

$980 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 得到双态组织, 并且随着热处理温度升高, 双态组织中初生 α 相体积分数减少 (图 1b、1c)。选取 5 个区域, 通过 Image-Pro Plus 6.0 软件定量统计经不同温度热处理后组织中初生 α 相的含量。结果显示, 热处理温度从 $960 \text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $980 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 初生 α 相体积分数从 48.9% 下降到 25.8%, 说明热处理温度对 Ti6321 合金 α 相含量有较大影响。图 1d 为相变点以上热处理后得到的由片层 α 相以及残余 β 相构成的魏氏组织, 该组织中不含等轴 α 相。

采用圆柱帽形受迫剪切试验方法研究材料绝热剪切变形及其破坏特性。试样采用优化后的强迫剪切结构^[12], 具体尺寸如图 2 所示。在冲击环境材料技术国家级重点实验室进行 Ti6321 合金在高应变率 (10^3 s^{-1} 量级) 下的绝热剪切试验, 利用 SHPB 对帽形试样进行加载。通过粘贴在入射杆和透射杆上的应变片记录脉冲信号, 依据应力波理论和均匀性假定^[17-20], 利用 D-Wave 软件分析试样电压随时间的变化历程。

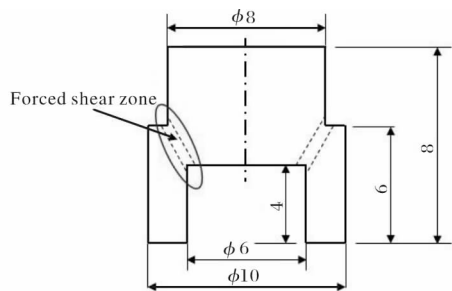


图2 帽形试样尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hat sample size

不同于圆柱形试样, 帽形试样在压缩过程中处于压剪复合的强迫剪切应力状态^[21]。由于帽形试样尺寸不规则, 通过计算得到的应变率不能作为准确的参考数据。为此, 利用激光测速仪测量实验中的压杆速度并作为冲击速度, 同时记录电压-时间曲线, 观察应力塌陷的时间节点, 最终得出不同冲击速度(15~25 m/s)下材料的承载时间和电压幅值, 以此反映材料的绝热剪切敏感性。

根据应力波基础理论与 SHPB 加载原理计算试样中应力波的加载时间。假定试样在加载过程中无剪切破坏, 根据式(1)计算纵波在试样中的传播速度(v)。

$$v = \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

式中: E 为压杆(压杆材质为 55CrSi 钢)弹性模量, 205 000 MPa; ρ 为压杆密度, $7.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。根据式(2)计算应力波加载时间(t)。

$$t = 2l/v \quad (2)$$

式中: l 为压杆长度, 200 mm。

计算可得透射脉冲宽度(即加载时间)约为 $78 \mu\text{s}$ 。若加载过程中出现剪切破坏, 试样承载能力下降, 透射脉冲宽度在不到 $78 \mu\text{s}$ 就提前下降, 出现应力塌陷。承载时间越长, 表明材料的绝热剪切敏感性越低, 反之则绝热剪切敏感性越高。

利用电火花切割机沿剪切试样轴向切取金相试样, 经打磨抛光后, 对其表面进行化学腐蚀。腐蚀剂由氢氟酸、硝酸和去离子水按体积比 1:5:44 混而成, 腐蚀时间为 6~8 s。利用光学显微镜观察绝热剪切试验后试样的微观组织。利用扫描电子显微镜(SEM)观察试样的绝热剪切带形貌。

2 结果与分析

2.1 不同组织的绝热剪切敏感性

图 3 为冲击速度 25 m/s 条件下 4 组试样受冲击

后的宏观照片。从图 3 可观察到每个试样都受到了不同程度的压缩。在魏氏组织试样(图 3d)表面可观察到扩展方向与轴向基本一致的宏观裂纹。等轴和双态组织试样(图 3a~3c)的表面未观察到开裂现象。

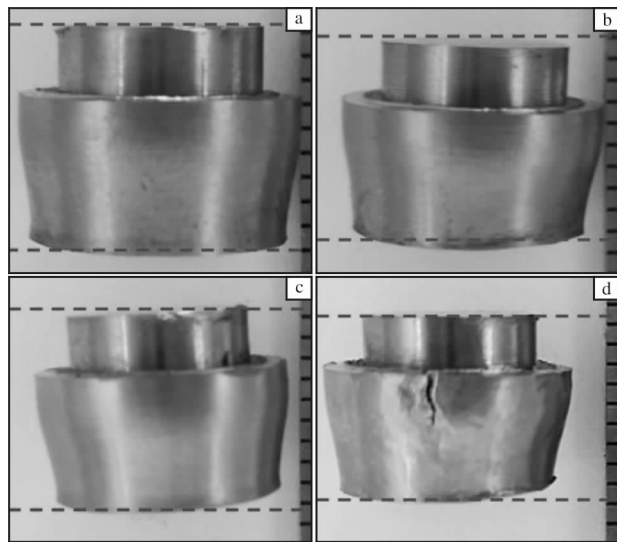


图3 绝热剪切试验后 4 组试样的宏观照片

Fig. 3 Macro photos of four specimens after adiabatic shear test: (a) EM; (b) BM1; (c) BM2; (d) WM

图 4 为冲击速度 25 m/s 条件下 4 组试样受冲击后的微观组织。由图 4 可知, 4 组试样中均存在沿强迫剪切方向发展的绝热剪切带, 其长度分别为 1.050、1.079、0.965、0.697 mm。帽形试样发生绝热剪切后, 绝热剪切带的长短反映了裂纹的扩展情况。双态组织试样 BM1 中绝热剪切带最长, 裂纹扩展得较浅, 魏氏组织试样 WM 中绝热剪切带最短, 裂纹扩展较为严重。通过对微观组织放大观察, 发现试样端口处均已出现撕裂痕。其中, 等轴和双态组织试样的撕裂痕较为光滑, 而魏氏组织试样的撕裂痕扩展较深, 且出现高低不平的微小凸起, 这是魏氏组织中大量纵横交错的初生 α 片层组织在裂纹扩展过程中被撕裂所造成的。

图 5 为冲击速度 25 m/s 条件下 4 组试样受冲击后的绝热剪切带形貌。从图 5 可以看出, 不同组织试样的绝热剪切带形貌存在明显差异。EM、BM1、BM2、WM 试样的绝热剪切带宽度分别约为 11.4、13.0、13.6、14.8 μm 。绝热剪切带的宽度反映了试样的变形程度, 剪切带越宽变形越严重。观察剪切带与周围基体的变形情况, 等轴组织试样的绝热剪切带周围晶粒发生了严重的拉长变形, 形成变形流线; 双态组织试样的绝热剪切带与基体有着明显的界限, 周

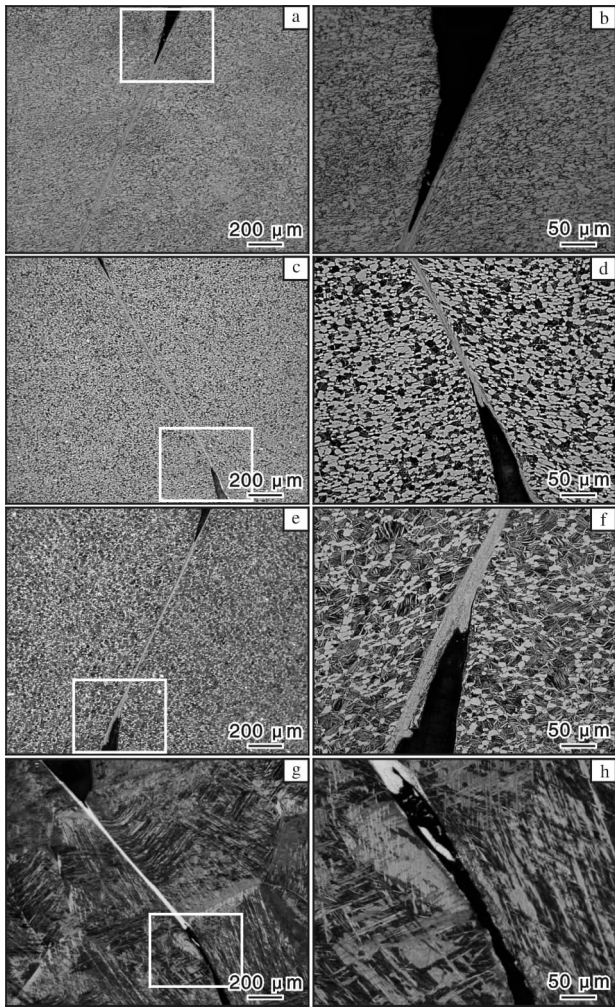


图 4 绝热剪切试验后 4 组试样的微观组织

Fig. 4 Microstructures of four specimens after adiabatic shear test: (a,b) EM; (c,d) BM1; (e,f) BM2; (g,h) WM

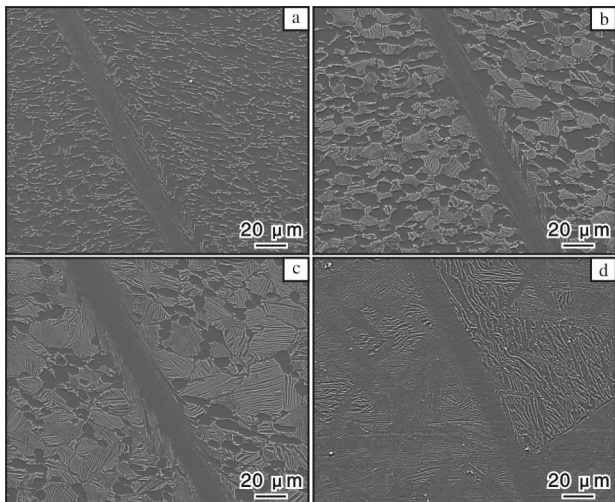


图 5 4 组试样的绝热剪切带形貌

Fig. 5 Morphologies of adiabatic shear band of four specimens: (a) EM; (b) BM1; (c) BM2; (d) WM

围的片层组织沿着剪切带拉伸，并且双态组织 BM2 试样的拉伸变形程度大于 BM1 试样；魏氏组织 WM 试样的剪切带周围基体没有方向性的流线，剪切带的扩展路径与一侧基体的片层方向大致相同，剪切带所在基体中的片层组织也出现了小部分的塑性流动。

图 6 为冲击载荷作用下 4 组试样的电压-时间曲线(冲击速度为 25 m/s)。从图 6 可以看出，魏氏组织试样的承载时间和电压幅值都明显低于双态组织和等轴组织试样，结合绝热剪切带长度、宽度及裂纹尖端扩展情况，说明魏氏组织试样的绝热剪切敏感性高于双态和等轴组织试样。这是因为魏氏组织的塑性变形能力较差，且纵横交错的片状组织间的协调变形能力也较差。而双态和等轴组织的晶粒细小，在受到外界作用时有更好的变形协调能力，冲击强度高于魏氏组织。另外，双态组织和等轴组织试样的电压-时间曲线比较接近，说明二者的绝热剪切敏感性较为接近。

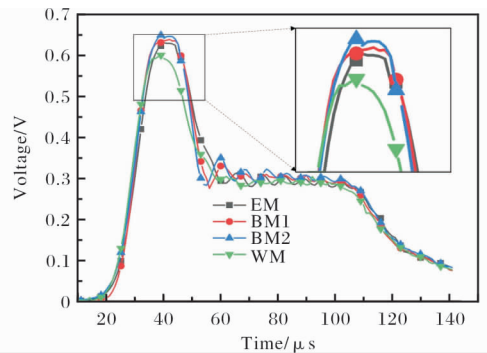


图 6 冲击载荷作用下 4 组试样的电压-时间曲线(冲击速度为 25 m/s)

Fig. 6 Voltage-time curves of four specimens under impact load at velocity of 25 m/s

2.2 冲击速度对绝热剪切行为的影响

图 7 为不同冲击速度下 4 组试样的电压-时间曲线。从图 7 可以看出，Ti6321 合金承载能力并非瞬时下降，而是存在一个逐步破坏的过程，尽管这个过程很短(10^{-2} s 数量级)。绝热剪切是造成材料承载能力下降的主要原因，且材料的绝热剪切敏感性越高，越容易发生绝热剪切^[12]。

由图 7 还可以看出，不同冲击速度下 4 组试样在应力波加载时间(78 μ s)内均出现了应力塌陷，说明均发生了剪切失效，且其加载时间呈现出一致的规律性，即随着冲击速度的升高而减小，表明随着冲击速度提高绝热剪切敏感性提高。冲击速度从

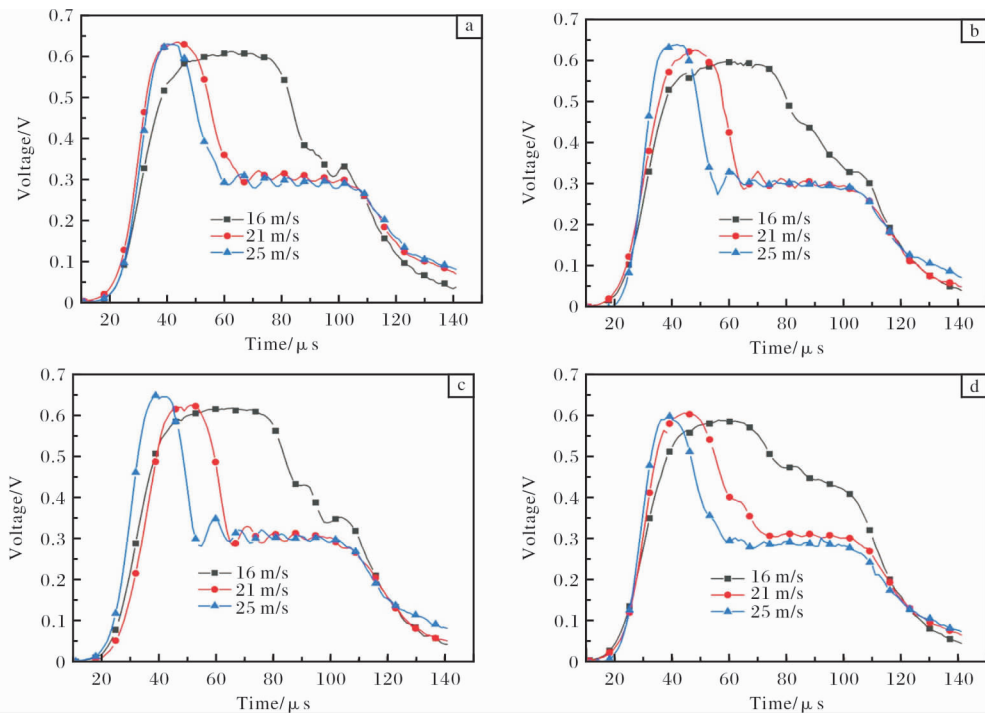


图7 不同冲击速度下4组试样的电压-时间曲线

Fig. 7 Voltage-time curves of four specimens at different impact velocities: (a) EM; (b) BM1; (c) BM2; (d) WM

16 m/s 提高到 21 m/s 时, 加载时间的下降幅值明显高于冲击速度从 21 m/s 提高到 25 m/s 的下降幅值。这是因为 Ti6321 合金存在应变率强化效应, 随着冲击速度增加(也即应变率增加), 材料产生明显的强化作用, 由此出现承载时间减少量缩小的现象。

图 8 为不同冲击速度下 4 组试样的加载时间对比图。从图 8 可以看出, BM1 试样的加载时间最长, WM 试样的加载时间最短。说明在该条件下 BM1 试样具有最低的绝热剪切敏感性, WM 试样具有最高的绝热剪切敏感性。在高速冲击下, 4 组试样的绝热剪切敏感性相差不大, 当冲击速度降低时, WM 试

样表现出更高的绝热剪切敏感性。

对比 2 种 α 相含量不同的双态组织试样, BM2 试样在 3 种冲击速度下的加载时间都低于 BM1 试样。说明对于双态组织, 随着初生 α 相含量降低, 绝热剪切敏感性增大。其原因在于热处理温度越低, Ti6321 合金含有的初生 α 相越多, 由于等轴状 α 相较片层 α 相有更好的塑性, 且增加 α 相尤其是球状 α 相的含量会减少晶界数量。这些因素使得 BM1 试样在受到外界作用时表现出更好的变形协调能力, 材料内部产生的能量更容易向四周扩散, 而不至于在局部位置产生较大温升, 发生绝热剪切。因此, BM1 试样具有更低的绝热剪切敏感性。

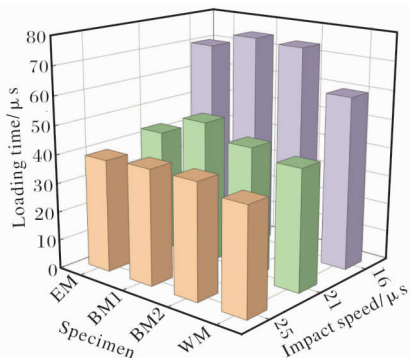


图8 不同冲击速度下4组试样的加载时间

Fig. 8 Loading time of four specimens at different impact velocities

3 结论

(1) 组织类型对 Ti6321 合金的绝热剪切行为影响较大。相比等轴组织和双态组织, 魏氏组织的绝热剪切敏感性更高。

(2) 随着热处理温度的升高, 双态组织中初生 α 相含量下降, 纵横交错的片状组织间协调变形能力较差, 绝热剪切敏感性增大。

(3) 在冲击载荷作用下, Ti6321 合金试样的承载能力并非瞬时下降, 存在逐渐破坏的过程。相的组成和分布对此破坏过程产生较大的影响。

参考文献 References

- [1] 杨胜利, 孙二举, 刘向前, 等. 热处理工艺对不同组织类型的 Ti6321 合金板坯组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 1002 - 1008.
- [2] 陈军, 王廷询, 周伟, 等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 8 - 12.
- [3] 王富强, 王德勇. 热处理对航空用 TC4 钛合金薄板力学性能影响研究[J]. 钛工业进展, 2017, 34(2): 24 - 27.
- [4] Gupta R K, Anil K, Rishi G, et al. Effect of heat treatment and combination of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of titanium alloy Ti6Al2V2Zr1.5Mo[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(9): 4405 - 4422.
- [5] Zhou T, Wu J, Che J T, et al. Dynamic shear characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V at large strain rates by the split Hopkinson pressure bar test[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 10(9): 167 - 177.
- [6] Chen J, Wang T X, Zhou W, et al. Domestic and foreign marine titanium alloy and its application[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(6): 8 - 12.
- [7] 王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992: 31 - 33
- [8] 张磊, 胡时胜, 吴家俊. α -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.
- [9] Ran C, Chen P W. Dynamic shear deformation and failure of Ti-6Al-4V and Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloys[J]. Materials, 2018, 11(1): 1790 - 2022.
- [10] 尤振平, 叶文君, 惠松晓, 等. TB10 钛合金的动态力学性能及绝热剪切分析[J]. 稀有金属, 2008, 32(6): 799 - 802.
- [11] 董新龙, 付应乾. TA2 钛合金动态压缩试样中的绝热剪切破坏研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(7): 1016 - 1020.
- [12] 王丁, 王琳, 代华湘, 等. TB2 钛合金动态力学性能及绝热剪切敏感性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(5): 100 - 103.
- [13] 付应乾, 董新龙, 虎宏智. 准静态和动态加载 TA2 工业纯钛受迫剪切破坏演化[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3092 - 3099.
- [14] Houssem B B, Charles M, Yessine A. Impact of the initial microstructure and the loading conditions on the deformation behavior of the Ti17 titanium alloy[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(4): 1765 - 1778.
- [15] 周哲, 王琳, 安瑞, 等. 高温、高应变率下 Ti6321 合金的力学行为及本构模型[J]. 钛工业进展, 2020, 37(5): 1 - 6.
- [16] Zhang C J, Guo C X, Zhang S Z, et al. Microstructural manipulation and improved mechanical properties of a near α titanium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 771: 1790 - 2022.
- [17] 邓志方, 黄西成, 谢若泽. SHPB 实验入射波形分析[C]//中国计算力学大会 2010(CCCM2010)暨第八届南方计算力学学术会议(SCCM8)论文集. 绵阳: 中国力学学会, 2010: 1606 - 1610.
- [18] 李少华. 霍普金森压杆试验中的两种波形整形技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 12 - 15
- [19] 刘卫, 孙晓霞, 沈瑞琪, 等. 霍普金森压杆实验中试件过载的模型分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2): 100 - 105.
- [20] Amine B, Tomasz J. Dynamic behavior of aluminum alloy aw 5005 undergoing interfacial friction and specimen configuration in split hopkinson pressure bar system at high strain rates and temperatures[J]. Materials, 2020, 13(20): 1 - 19.
- [21] 刘新芹, 谭成文, 张静, 等. 应力状态对 Ti-6Al-4V 绝热剪切敏感性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1522 - 1525.

2021 年 1—3 月日本钛产品进出口数据统计

日期	出口量/t			进口量/t		
	未锻轧钛	粉末及废旧料	其他钛制品	未锻轧钛及粉末	废旧料	其他钛制品
2021 年 1 月	1020	210	476	29	2	124
2021 年 2 月	1994	425	422	12	71	135
2021 年 3 月	2373	383	691	71	64	91
合计	7387	1018	1589	112	137	350