

# 不同热处理条件下 Ti-1023 钛合金的 绝热剪切敏感性

郭文静<sup>1</sup>, 张继林<sup>2\*</sup>, 贾海深<sup>1</sup>, 易湘斌<sup>1,2</sup>, 罗文翠<sup>1,2</sup>

(1. 兰州工业学院, 甘肃省高校绿色切削加工技术及应用重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州工业学院, 甘肃省精密加工技术及装备工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 利用 Hopkinson 压杆试验系统对圆柱形试样进行室温动态压缩冲击试验, 研究不同热处理制度下 Ti-1023 钛合金的微观组织、绝热剪切带的形成特征。结果表明, 相变点以上固溶处理使 Ti-1023 合金组织晶粒尺寸增大,  $\beta$  晶界处析出细针状  $\alpha$  相; 相变点以下的固溶时效使晶粒内部析出大量球状  $\alpha$  相, 相变点以下的固溶双重时效处理的组织晶粒更为细小均匀。在较高应变率加载条件下, 不同组织均表现出明显的应变率增强和增塑效应, 具有明显的热塑性失稳特征。相变点以上固溶时效组织动态强度高, 但塑性差, 绝热剪切敏感性最大; 相变点以下固溶单重时效组织最不易发生绝热剪切, 但强度低; 固溶双重时效组织比固溶单重时效组织的动态强度高, 塑性较好, 具有最好的抗冲击承载能力。

**关键词:** Ti-1023 钛合金; 固溶时效; 力学性能; 微观组织; 绝热剪切

中图分类号: TF823, TG146

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)01-0071-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Adiabatic shear sensitivity performance of Ti-1023 alloys at different heat treatment regimes

Guo Wenjing<sup>1</sup>, Zhang Jilin<sup>2\*</sup>, Jia Haishen<sup>1</sup>, Yi Xiangbin<sup>1,2</sup>, Luo Wencui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Green Cutting Technology and Application in Gansu Province, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Precision Machining Technology and Equipment Engineering Research Center of Gansu Province, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Using the Hopkinson pressure bar test system to conduct room temperature dynamic compression experiments for cylindrical samples, the formation characteristics of adiabatic shear bands and the microstructure of Ti-1023 titanium alloy under different heat treatment regimes were studied. The results show that the grain size of Ti-1023 alloy is increased by the solid solution treatment above the phase transition point. The fine acicular  $\alpha$  phase precipitates at the  $\beta$  grain boundary. The solid solution aging below the phase transition point causes a large number of spherical  $\alpha$  phases in the grains, and the grain size of the tissue grains with dual aging treatment is even smaller. Under the loading conditions of different strain rates, all different tissues show obvious strain rate enhancement and plasticizing effect,

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(22YF7GA132); 甘肃省重点人才项目(甘组通字[2022]77号); 甘肃省高等学校创新基金项目(2021B-319); 甘肃省产业支撑项目(2021CYZC-52)。

作者简介: 郭文静, 1984 年出生, 女, 甘肃天水人, 硕士, 讲师, 主要从事材料力学性能、切削性能及摩擦学领域研究, E-mail: wenjing0622@163.com; \* 通讯作者: 张继林, 1987 年出生, 男, 甘肃民乐人, 硕士, 副教授, 主要从事材料的动态力学性能、材料疲劳性能以及切削性能研究, E-mail: zjl-0111@163.com。

reflecting apparent characteristics of thermoplastic instability. The dynamic strength of the solid solution aging group above the phase transition point was the highest, but the plastic difference was the worst and being presented with the greatest adiabatic shear sensitivity. It is the most difficult to produce adiabatic shear in the solid solution single aging structures below the phase transition point, but the material strength is low. The solid solution dual aging tissue has higher dynamic strength and better plasticity than the solid solution single heavy aging tissue, which has the best resistance to impact bearing capacity.

**Key words:** Ti-1023 titanium alloy, solution and aging, mechanical properties, microstructure, adiabatic shear

## 0 引言

Ti-10V-2Fe-3Al (即 Ti-1023) 为高强高韧近  $\beta$  型钛合金, 具有良好的显微组织和力学性能可控性, 通过不同的热处理工艺可以实现不同强度、塑性和韧性水平的匹配, 满足损伤容限设计需要和高结构效益、高可靠性和低成本要求, 被广泛用于制作飞机机身、机翼和起落架结构件<sup>[1-2]</sup>。 $\beta$  钛合金受到高速冲击时经常以热塑性失稳的破坏形式失效, 是典型的绝热剪切敏感材料。由于不同热处理制度对材料的动态冲击动力学行为及其使用性能有重要影响, 因此研究不同组织状态的 Ti-1023 钛合金动态力学性能具有重要意义。

国内外学者对  $\beta$  钛合金研究长期集中在准静态加载情况下的热变形行为以及微观组织对材料力学性能的影响<sup>[3-6]</sup>。邱伟<sup>[7]</sup>的研究表明, 应变速率对合金流动应力的影响较显著, 而变形温度对合金流动应力的影响在较高应变速率时较大, 而在较低应变速率时较小。鲍如强等<sup>[8-9]</sup>通过对比研究发现, 在  $\beta$  相变点以上或以下变形时, Ti-1023 变形温度和变形速率对合金的流变应力影响不同。张维<sup>[10]</sup>对不同规格及位置棒材的拉伸测试表明: 随着显微组织的等轴初生  $\alpha$  相的增多和尺寸的减小, 室温强度提高, 随着棒材的规格增大, 其强度略有降低。王晓燕<sup>[11]</sup>对 Ti-1023 合金静态拉伸及断裂性能的研究表明, 减少初生  $\alpha$  相的体积分数、控制合适的次生  $\alpha$  相数量和尺寸并尽可能减少连续晶界  $\alpha$  相数量与尺寸, 可获得较高的强韧性匹配。

近年来, 对  $\beta$  钛合金动态力学性能的研究成为热点。王丁等<sup>[12]</sup>对相变点之下的固溶时效 TB2 钛合金进行冲击试验, 发现  $\alpha$  相的强化使材料屈服强度与平均流变应力升高, 塑性下降。He J<sup>[13]</sup>认为时效温度过高会导致 TB2 钛合金强度下降、塑性提高。尤振平<sup>[14]</sup>在两相区固溶时效、固溶双重时效的

TB10 试样中观察到绝热剪切带及裂纹, 单一固溶态试样中未发现绝热剪切带, 但出现了应力诱发马氏体相。常辉等<sup>[15-16]</sup>研究表明,  $\beta$  钛合金大多具有较强的应变率增强、增塑和温度软化、应力诱发马氏体相变等效应, 但不同组织的钛合金动态冲击力学性能有所不同。

鉴于中高强度钛合金的使用日益广泛, 而目前对 Ti-1023 钛合金动态压缩行为及绝热剪切演化机制还不明确, 为充分发挥其高强、高韧的综合性能, 有必要研究不同热处理制度下 Ti-1023 钛合金组织在高应变率加载条件下动态冲击力学性能, 观察绝热剪切带的生成特征, 为此类材料的选型设计提供依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料及条件

试验材料为 100 mm×100 mm×50 mm 的 Ti-1023 钛合金锻件, 其化学成分见表 1, 金相法测定合金相变点为 800 °C±5 °C。

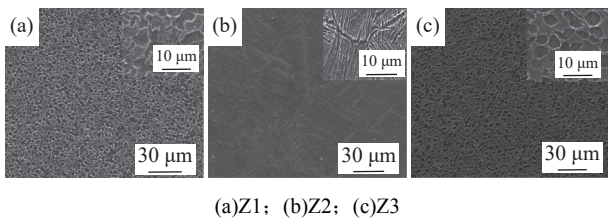
表 1 Ti-1023 钛合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of Ti-1023 alloy %

H	O	N	Fe	Al	V	Ti
0.01	0.03	0.03	1.93	2.93	10.13	余量

Ti-1023 钛合金锻件的显微组织为  $\beta$  基体内均匀分布弥散的细条状初生  $\alpha$  相,  $\alpha$  相晶粒平均直径 10  $\mu\text{m}$ 。试样采用电火花线切割方法加工成薄板, 分别经相变点以下固溶-时效、相变点以上固溶-时效, 以及相变点以下固溶-双重时效热处理后, 加工成  $\text{O}4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  圆柱状试样。试样编号及热处理工艺如下: Z1(760 °C, 2 h, AC+525 °C, 4 h, AC)、Z2(830 °C, 2 h, AC+525 °C, 4 h, AC)、Z3(760 °C, 2 h, AC+255 °C, 2 h, AC+525 °C, 2 h, AC)。

### 1.2 热处理后的显微组织

图 1 为扫描电子显微镜下拍摄的三种热处理制度下 Ti-1023 钛合金的显微组织。图 1(a) 为相变点以下固溶-时效热处理后的显微组织 (Z1)。初生  $\alpha$  相率先在  $\beta$  晶粒边界形核、长大, 相互连接贯通, 形成一个大小不一的晶粒, 尺寸约  $3 \sim 8 \mu\text{m}$ ,  $\beta$  相基体内弥散分布着析出的次生  $\alpha$  相。图 1(b) 为相变点以上固溶-时效热处理后的显微组织 (Z2)。为粗大的  $\beta$  相等轴晶, 尺寸超过  $300 \mu\text{m}$ , 晶内析出少量相互平行的灰白色细条状淬火马氏体, 沿  $\beta$  晶界存在大量细密的针状次生  $\alpha$  相析出物。图 1(c) 为相变点以下固溶-双重时效热处理后的显微组织 (Z3)。组织中多为均匀分布的单个独立的卵圆形初生  $\alpha$  相, 尺寸约  $5 \mu\text{m}$ ,  $\alpha$  相含量较 Z1 有所降低,  $\beta$  相体积较 Z1 更为粗大,  $\beta$  相内析出的次生  $\alpha$  相更为细小均匀。



(a)Z1; (b)Z2; (c)Z3

图 1 三种热处理制度下 Ti-1023 钛合金组织的显微形貌  
Fig. 1 Microstructure of Ti-1023 titanium alloy under three heat treatment systems

### 1.3 试验过程

动态压缩试验在绿色切削重点实验室的高温分

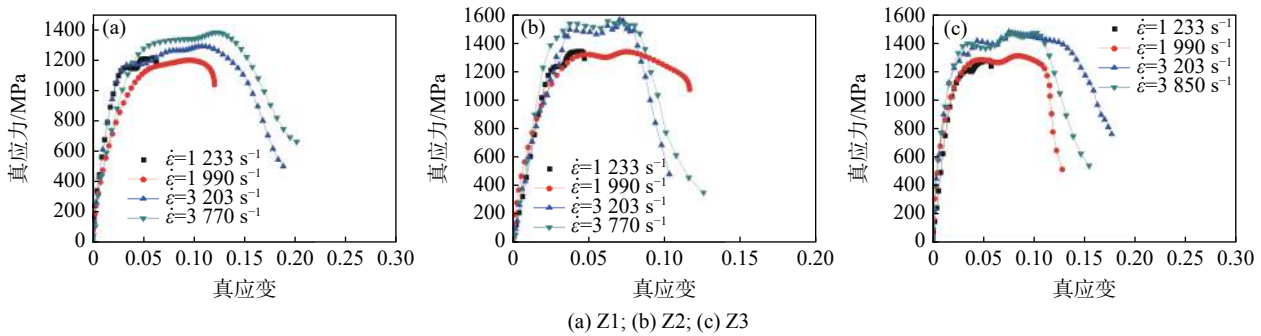


图 2 Ti-1023 钛合金三种组织的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of three microstructures of titanium alloy

### 2.2 不同组织的绝热剪切敏感性

由应力波理论和 Hopkinson 压杆加载原理可知, 当子弹长度  $L=100 \text{ mm}$ , 压杆中纵波波速  $5000 \text{ m/s}$ , 则加载时间约  $40 \mu\text{s}$ 。若试验透射脉冲宽度大于  $40 \mu\text{s}$ , 说明试样在加载过程中无提前破坏, 若透射脉冲宽度在不到  $40 \mu\text{s}$  就提前下降, 出现应力塌陷,

离式 Hopkinson 压杆 (Separate Hopkinson Press Bar, SHPB) 上进行, 用于测定应变率为  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  范围内材料的动态力学性能。

试验在常温下进行, 通过调节气压实现子弹对试样  $1000$ 、 $2000$ 、 $3000$ 、 $4000 \text{ s}^{-1}$  左右应变率加载。子弹长度  $100 \text{ mm}$ , 压杆直径  $8 \text{ mm}$ 。为降低误差, 取三组试验有效数据的均值进行分析。采取超动态应变仪记录加载过程中的电压-时间关系, 通过分析和处理得出试样受到单轴压缩应力状态下的应力-时间曲线。观察应力塌陷的时间节点, 得出不同冲击应变率下材料的承载时间, 并以此研究材料的绝热剪切敏感性。试验结束后, 对试样沿轴向线切割、研磨、抛光和镶样, 使用 Kroll 溶液腐蚀, 采用 FEI Inspect F50 扫描电镜观察试样显微组织和断口。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 应力-应变关系

图 2 为三种热处理工艺下的 Ti-1023 钛合金在不同应变率加载下的真应力-应变曲线。所有组织大致呈现出应变率增强和应变率增塑效应。在不同应变率下, Z1 具有最大的断裂应变和最低的流变应力; Z2 组织则具有最高的流变应力和最低的断裂应变, 则表现出较高的强度和塑性, 具有最好的动态力学性能。

则说明加载过程出现绝热剪切变形局部化或断裂时效。承载时间越短, 说明材料绝热剪切敏感性越高, 反之, 则说明材料绝热剪切敏感性越低。

图 3 为应变率在  $1000$ 、 $2000$ 、 $3000$ 、 $4000 \text{ s}^{-1}$  左右, Ti-1023 钛合金不同组织动态压缩试验的应力-时间曲线。可以看到, 在应变率  $1000 \text{ s}^{-1}$  左右,

各试样的承载时间均在 40 μs 左右,表明各试样未发生提前应力卸载。在应变率 2 000 s<sup>-1</sup> 左右, Z1 试样未发生应力塌陷, Z2、Z3 试样则提前卸载, 其中 Z2 承载时间最短, 在承载了 32 μs 后发生应力塌陷。在应变率 3 000 s<sup>-1</sup> 及 4 000 s<sup>-1</sup> 左右时, 所有试样均发生应力塌陷卸载, 其中, Z1 承载时间最长, Z2 承载时间最短, Z3 承载时间居中。可见, 不同热处理制度对 Ti-1023 钛合金在高应变率下的承载能力影响显著。在不同的加载应变率下, Z2 试样承载时间均为最短, 反映出相变点以上固溶时效处理后 Ti-1023 钛合金组织的绝热剪切敏感性最强。Z1 试样承载时间均为最长, 反映出相变点以下固溶-时效处理后合金组织对绝热剪切最不敏感。Z3 试样承载

时间居中, 说明相变点以下固溶-双重时效处理后合金组织绝热剪切敏感性一般。

Z1 中的等轴初生 α 相数量最多, 且相互连接, 尺寸较大, 初生 α 相由于强度较低, 易发生较大的变形, 高应变加载时, 可通过自身变形协调载荷的不均匀性, 这是其具有较低绝热剪切敏感性的原因。

Z2 为相变点以上固溶时效处理后得到的片层组织, 为单一 β 晶粒。固溶时效处理后在原始 β 相中析出大量细小次生 α 相, 对基体有析出强化作用, 使得材料强度很高而塑性较低。晶界和晶粒内部析出的针状 α 相纵横交错, 能够有效阻碍合金中的位错运动, 产生应力集中容易诱发裂纹, 提高了材料的绝热剪切敏感性。

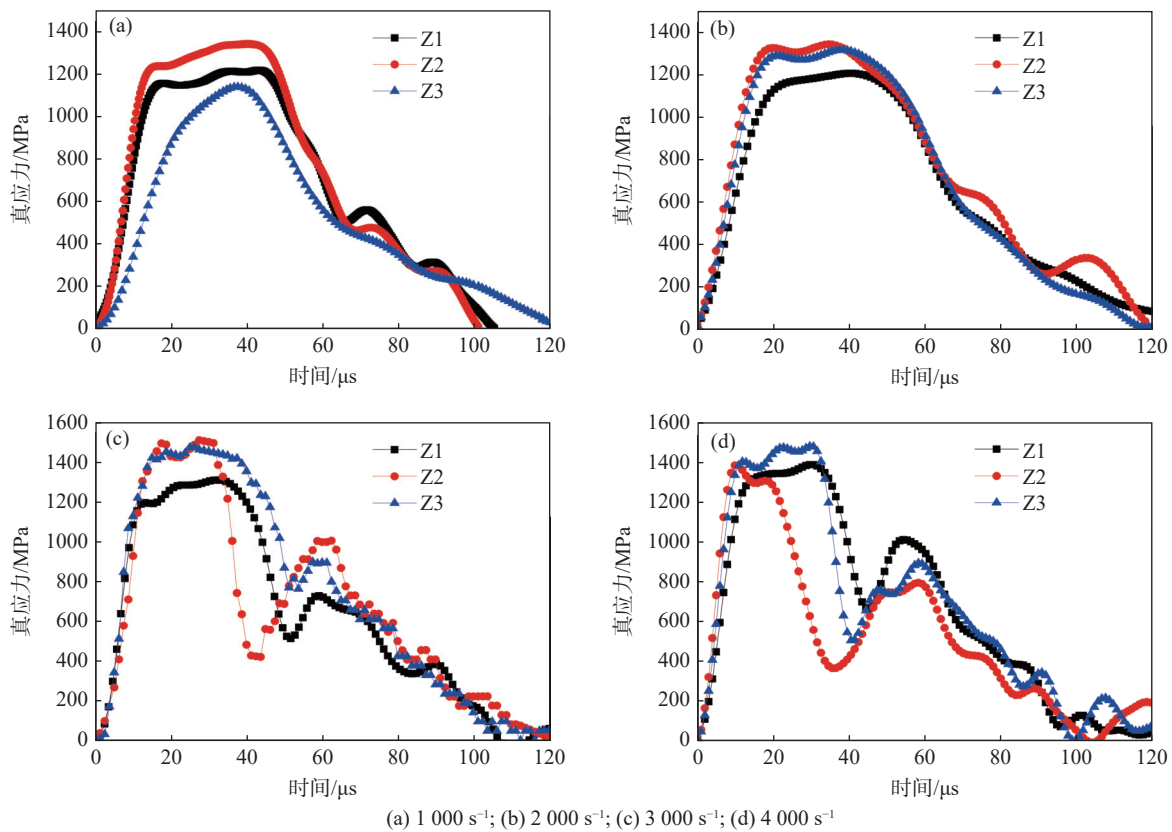


图 3 Ti-1023 钛合金不同组织在相同应变率下动态压缩应力-时间曲线

Fig. 3 Dynamic compressive stress-time curves of Ti-1023 alloy with different structures under the same strain rate

Z3 中初生 α 相含量有所降低, β 相晶粒尺寸较 Z1 粗大, 采用双重时效热处理析出的针状次生 α 相比单重时效更为细小均匀。文献 [17-18] 认为低温时效热时析出的等温 ω 相为次生 α 相形核提供了更多的形核质点, 而弥散细小的 ω 相又会抑制次生 α 相的长大, 从而获得比单重时效处理更加均匀分布的 α+β 显微组织。由于 α/β 相界面成为位错滑移

的障碍, 而细小弥散次生 α 相则有效的提高了合金的强度, 使得材料在保持塑性的同时, 强度有所提高。本次试验获取的尺寸较小的次生 α 相更容易在冲击过程中发生加工硬化, 引起应变局部化, 使得材料塑性有所下降。

### 2.3 不同组织的绝热剪切带形貌

鉴于应变率 2 000 s<sup>-1</sup> 未发现 Z1 组织的绝热剪

切带, 图 4(a) 为 Z1 在应变率  $3\,000\text{ s}^{-1}$  时沿  $45^\circ$  方向发展的绝热剪切带 (ASB) 形貌, 剪切带由中心转变带、两侧形变带和未变形的基体构成。转变带则由流线形态的致密条带状组织构成, 宽度约  $8\ \mu\text{m}$ 。形变带受剪切力作用而拉长, 初生  $\alpha$  相呈现大塑性变形的迹象,  $\alpha+\beta$  相沿剪切带扩展方向呈现不同程度的弯曲。图 4(b) 为更大倍数下的扫描电镜照片, 发现剪切带中心的两段微裂纹尖端之间出现若干微小孔洞, 同时看到中部的微孔洞已经开始连接, 正在形成更大的孔洞。图 4(c) 为处于形变带与基体边界的微裂纹, 同时还在形变带与基体边界观察到剪切带分叉现象。裂纹尖端均位于相邻的  $\alpha/\beta$  转变基体界面处,  $\beta$  相变形程度较  $\alpha$  相更大, 由于二者变形协调能力不同, 造成微裂纹在  $\alpha$  相两侧的  $\beta$  相边界处萌生。由此总结出两种剪切带裂纹形成特征: 一种是微孔洞在剪切带内萌生, 在剪切力作用下不断长大、相互连接并贯通扩展, 形成裂纹; 另一种为微裂纹率先在  $\alpha/\beta$  转变基体界面处萌生, 在剪切力作用下沿形变带与基体边缘扩展开裂。

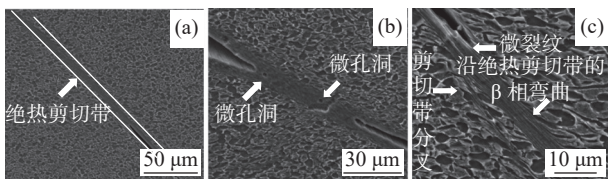


图 4 Ti-1023 钛合金双态组织绝热剪切带 (Z1 应变率  $3\,000\text{ s}^{-1}$ )

Fig. 4 Adiabatic shear band of Ti-1023 alloy duplex microstructure (Z1) at  $3\,000\text{ s}^{-1}$

图 5(a) 为 Z2 在应变率  $2\,000\text{ s}^{-1}$  时, 沿着  $45^\circ$  方向直线基本贯穿整个试样的绝热剪切带形貌, 可见剪切带横穿整个  $\beta$  等轴晶粒。 $\beta$  等轴晶粒直径约  $300\ \mu\text{m}$ , 晶粒尺寸的增大说明晶界数量减少, 减小了对剪切带扩展的阻碍, 意味着该组织绝热剪切敏感性的增加。图 5(b) 为晶界附近的剪切带形貌, 反映了一种剪切带裂纹形成特征, 裂纹萌生于垂直剪切带的针状  $\alpha$  次生相集中区与基体的边界处, 由于剧烈的绝热剪切滑移作用, 使得晶界发生了错位, 看到晶粒沿着剪切带方向滑移约  $50\ \mu\text{m}$ 。可以判断, 塑性变形过程中, 滑移带由于受到垂直萌生于晶界的针状  $\alpha$  次生相阻碍, 前端位错在强度较高的次生  $\alpha$  相的集中区域发生塞积, 影响了后续位错的继续滑移, 产生应力集中, 形成微裂纹。图 5(c) 为晶粒中部的剪切带形貌, 剪切带宽度约  $3\ \mu\text{m}$ , 剪切带附

近出现大量微孔洞, 在  $45^\circ$  剪切带上有三个大小不一的孔洞和裂纹, 反映出孔洞的长大、连接、相互贯穿, 最终形成裂纹的过程。

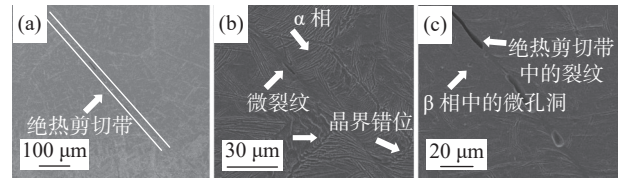


图 5 Ti-1023 钛合金等轴组织绝热剪切带 (Z2 应变率  $2\,000\text{ s}^{-1}$ )

Fig. 5 Adiabatic shear band of Ti-1023 alloy equiaxed microstructure (Z2) at  $2\,000\text{ s}^{-1}$

图 6(a) 为 Z3 在应变率  $2\,000\text{ s}^{-1}$  时, 沿着  $45^\circ$  方向直线分布的绝热剪切带形貌, 剪切带并未贯穿试样, 宽度不到  $3\ \mu\text{m}$ , 剪切带内未观察到显著的塑性大变形迹象, 主要为  $\beta$  相变形组织。图 6(b) 中发现剪切带中心存在若干尚未变形的球状初生  $\alpha$  相, 说明相比  $\alpha$  相,  $\beta$  相更易变形, 均匀分布的  $\alpha$  相和时效析出的次生  $\alpha$  相对  $\beta$  基体形成了第二相强化, 提高了材料的强度。图 6(c) 为图 (b) 放大照, 可见剪切带附近的  $\alpha$  相组织未发生明显变形, 在  $\beta$  相中的次生  $\alpha$  相以及球状初生  $\alpha$  相中, 均发现大量微孔洞。

在应变率相同的情况下, 试样获得的能量相同, 能量使得绝热剪切带在剪切方向和宽度方向同时发展, Z3 组织试样在剪切带长度和宽度上均小于 Z2 组织, 说明 Z3 组织在塑性变形过程中可开动的滑移系较多, 尺寸较小的初生  $\alpha$  相可以迅速将滑移分散到更多晶粒中去, 不易在某些位向的  $\alpha$  相晶粒中引起应力集中, 绝热剪切敏感性较低。

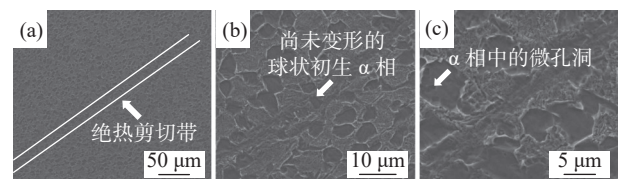


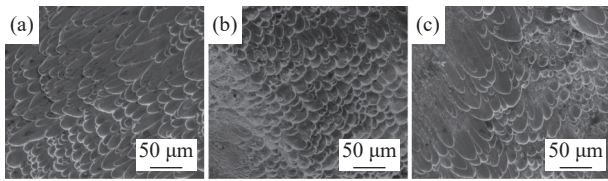
图 6 Ti-1023 钛合金双态组织绝热剪切带 (Z3 应变率  $2\,000\text{ s}^{-1}$ )

Fig. 6 Adiabatic shear band of Ti-1023 alloy duplex microstructure (Z3) at  $2\,000\text{ s}^{-1}$

#### 2.4 剪切断口分析

图 7 分别为应变率  $4\,000\text{ s}^{-1}$  左右时, 三种组织的冲击压缩剪切区断口光滑区 SEM 像。所有断口均为  $45^\circ$  剪切断口, 由粗糙区和光滑区两种不同特征区域构成, 光滑区形成大量的抛物线和卵形相聚, 沿着剪切方向被拉长, 为典型剪切型韧窝形貌,

大小不一的韧窝也反映出在剪切滑移阶段中微孔洞逐渐形核、生长、连接和相互贯通的全过程。



(a)Z1; (b)Z2; (c)Z3

图7 Ti-1023钛合金三种组织剪切断面形貌(应变率 $4\ 000\ \text{s}^{-1}$ )

Fig. 7 Three kinds of structural shear fracture morphology of Ti-1023 alloy at the strain rate of  $4\ 000\ \text{s}^{-1}$

对比三种组织的断面,图7(a)抛物线状韧窝数量最多,长度最长,开口最小,说明固溶单重时效的双态组织塑性很高,在相同应变率条件下发生剪切时变形更大,不易发生破坏;图7(b)则主要为大量卵圆形韧窝聚集,图片左侧区域有大面积的河滩状花样,反映出片层组织的塑性相对较差,易发生断裂失效;图7(c)则为一定数量的抛物线状韧窝和卵圆形韧窝,说明固溶双重时效的双态组织塑性在三种组织中居中。试样断口的分析结果也验证了前面对

几种组织及性能的相关结论。

### 3 结论

1) 热处理制度对 Ti-1023 钛合金动态力学性能有显著影响。相变点以上固溶时效得到的等轴组织具有较高的强度和较低的塑性,相变点以下固溶时效得到的双态组织强度稍低,塑性较大。在高应变率条件下,三种组织都有一定的应变率增强、增塑效应,固溶双重时效工艺得到的双态组织具有最佳的强韧性匹配。

2) 不同 Ti-1023 钛合金微观组织具有不同的绝热剪切敏感性。相变点以上固溶单重时效获取的等轴组织绝热剪切敏感性最大,相变点以下固溶单重时效获得的双态组织绝热剪切敏感性最小,固溶双重时效得到的双态组织绝热剪切敏感性居中。

3) 孔洞的增殖与连接、位错的塞积是绝热剪切带内微裂纹生成的主要原因。固溶双重时效热处理工艺使初生  $\alpha$  相细化和次生  $\alpha$  相均匀化,降低了材料绝热剪切敏感性,有利于提高冲击载荷下材料的承载能力。

### 参考文献

- [1] Zhu Zhishou. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in China[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(4): 44–50.  
(朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(4): 44–50.)
- [2] Ye Yong, Wang Jinyan. An overview on application status and processing technology development of titanium alloy[J]. *Materials Review*, 2012, 26(S2): 360–363.  
(叶勇, 王金彦. 钛合金的应用现状及加工技术发展概况[J]. *材料导报*, 2012, 26(S2): 360–363.)
- [3] Yang Dongyu, Fu Yanyan, Hui Songxiao, *et al.* Research and application of high strength and high toughness titanium alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Materials*, 2011, 35(4): 575–580.  
(杨冬雨, 付艳艳, 惠松晓, 等. 高强高韧钛合金研究与应用进展[J]. *稀有金属*, 2011, 35(4): 575–580.)
- [4] Raghuna S L, Stapleton A M, Dashwood R J, *et al.* Micromechanics of Ti-10V-2Fe-3Al: In situ synchrotron characterisation and modelling[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 6861–6872.
- [5] Jim Williams. Thermo-mechanical processing of high-performance Ti alloys: recent progress and future needs[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 117(3): 370–373.
- [6] Welk Brian A. Microstructural and property relationships in  $\beta$ -titanium alloy Ti-5553[D]. US: Ohio State University, 2010.
- [7] Qiu Wei, Lu Shiqiang, Ouyang Delai. Investigation on the hot temperature deformation behavior and microstructure evolution of forged titanium alloy TB6[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2010, 17(3): 38–43.  
(邱伟, 鲁世强, 欧阳德来, 等. 锻态TB6钛合金热变形行为及组织演变[J]. *塑性工程学报*, 2010, 17(3): 38–43.)
- [8] Ouyang Delai, Lu Shiqiang, Cui Xia, *et al.* Transformation of deformation-induced martensite in TB6 titanium alloy[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(12): 2307–2312.  
(欧阳德来, 鲁世强, 崔霞, 等. TB6钛合金热变形诱导马氏体转变[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(12): 2307–2312.)

- [ 9 ] Bao Ruqiang, Huang Xu, Huang Lijun. Investigation on hot processes of Ti-10V-2Fe-3Al alloy[J]. Chinese Journal of Rare Materials, 2005, 29(2): 214–218.  
(鲍如强, 黄旭, 黄利军. Ti-10V-2Fe-3Al合金热工艺的研究[J]. 稀有金属, 2005, 29(2): 214–218.)
- [ 10 ] Zhang Wei, Wang Kaixuan, Wang Tao, *et al.* Study on microstructure and property of Ti-1023 titanium alloy bar[J]. Chinese Hot Working Technology, 2013, 42(17): 117–119.  
(张维, 王凯旋, 王涛, 等. Ti-1023钛合金棒材组织和性能的研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(17): 117–119.)
- [ 11 ] Wang Xiaoyan, Liu Jianrong, Lei Jiafeng, *et al.* Effects of primary and secondary  $\alpha$  phase on tensile property and fracture toughness of Ti-1023 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(11): 1129–1137.  
(王晓燕, 刘建荣, 雷家峰, 等. 初生及次生 $\alpha$ 相对Ti-1023合金拉伸性能和断裂韧性的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(11): 1129–1137.)
- [ 12 ] Wang Ding, Wang Lin, Dai Huaxiang, *et al.* Dynamic properties and adiabatic shear sensitivity of TB2 titanium alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(5): 100–103.  
(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 ] He J, Li D, Chen H, *et al.* Microstructures and mechanical properties of TB2 forgings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(8): 152–155.
- [ 14 ] You Zhenping, Ye Wenjun, Hui Songxiao, *et al.* Study on dynamic mechanical properties and adiabatic shearing of TB10 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Materials, 2008, 32(6): 799–802.  
(尤振平, 叶文君, 惠松骁, 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.)
- [ 15 ] Chang Hui. Solid phase transformation kinetics and microstructure evolutions of Ti-B19 alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.  
(常辉. Ti-B19合金的固态相变动力学及其组织演变规律[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.)
- [ 16 ] Ma Quan, Guo Aihong, Zhou Lian. Microstructure evolution and tensile properties of Ti1023 titanium alloy during aging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(6): 1219–1225.  
(马权, 郭爱红, 周廉. Ti1023钛合金在时效过程中的组织演化和拉伸性能[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(6): 1219–1225.)
- [ 17 ] Ivasishin O M, Markovsky R, Semiatin S L, *et al.* Aging response of coarse- and fine-grained  $\beta$  titanium alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 405(1/2): 296–305.
- [ 18 ] Shang Guoqiang, Kou Hongchao, Fei Yue, *et al.* Influence of aging processing on microstructure and mechanical properties of Ti-10V-2Fe-3Al alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2010, 39(6): 1061–1065.  
(商国强, 寇宏超, 费跃, 等. 时效工艺对Ti-10V-2Fe-3Al合金显微组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(6): 1061–1065.)