

文章编号: 1001-1455(2010)03-0320-05

平面撞击对 Ti6Al4V 合金结构的影响*

温霞¹, 杨世源¹, 王军霞¹, 张林², 刘小楠¹

(1. 西南科技大学材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用一级轻气炮对 Ti6Al4V 合金进行对称与非对称正碰撞冲击, 回收冲击样品, 并进行电镜扫描和 X 射线衍射分析。结果表明: 随着冲击速度的增加, 样品发生不同程度的变形, 材料内部产生微裂纹并导致材料发生损伤, 而损伤进一步促进了微裂纹的产生、扩展; 由 X 射线分析结果可知, 冲击使材料的晶面发育更加完整, 并在材料冷却过程中出现一种亚稳态结构, 在一定程度上可提高冲击韧性。

关键词: 固体力学; 晶体结构; 平面撞击; Ti6Al4V 合金; 变形; 裂纹

中图分类号: O347 **国标学科代码:** 130 · 15 **文献标志码:** A

1 引言

钛合金具有较高的比强度和比模量、良好的氧化性和抗蠕变性、优良的温度强度和刚度、较低的密度等, 是一种很有发展前途的高温结构材料, 被广泛应用于汽车、飞机等民用及军工领域^[1-6]。由于 Ti6Al4V 合金强度高、塑性好、蠕变强度较高、低温时有良好的韧性并具有良好的抗海水腐蚀及抗热盐腐蚀的能力, 适于制造在 400 °C 以下长期工作的机器零件, 因此在钛合金的应用中大部份为 Ti6Al4V^[7-11]。本文中侧重于研究冲击动载荷下 Ti6Al4V 合金的形貌及微观结构的变化, 分析 Ti6Al4V 合金裂纹的生长变化, 为提高 Ti6Al4V 的宏观性能研究提供参考。

2 实验装置

平板撞击实验在中国工程物理研究院流体物理研究所 $\varnothing 100$ mm 一级轻气炮上进行, 实验结构为飞片/样品。实验分 2 组进行: (1) 对称正碰撞方式, 飞片为 Ti6Al4V, 飞片速度分别为 400、500 m/s。(2) 非对称正碰撞方式, 飞片为 45 钢, 飞片速度为 600 m/s。实验装置如图 1 所示。其中飞片直径 60 mm、厚 3 mm, 样品直径 90 mm、厚 6 mm。

采用气炮驱动平面飞片, 在靶中产生矩形冲击波, 对样品进行软回收。为避免冲击后的样品与样品盒底部发生 2 次碰撞, 在样品盒内放入聚碳酸酯对样品进行固定, 聚碳酸酯的尺寸与样品一致, 并在靠近样品的一端留一小孔, 用于吸收一部分冲击余力, 对靶起到缓冲作用。冲击后回收到的样品见图 2。图中给出了层裂面的完整面貌, 说明软回收是成功的。

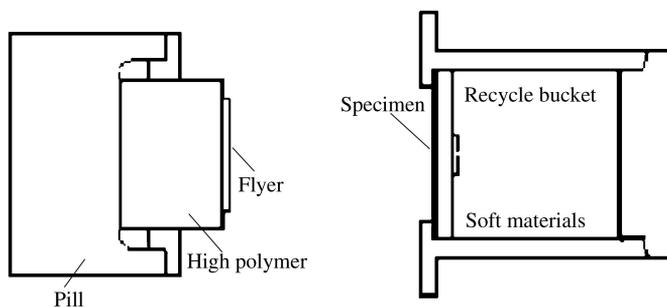


图 1 平面撞击实验装置示意图

Fig. 1 Experimental device of plane shock loading

* 收稿日期: 2009-02-12; 修回日期: 2009-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(10476023)

作者简介: 温霞(1985—), 女, 硕士。

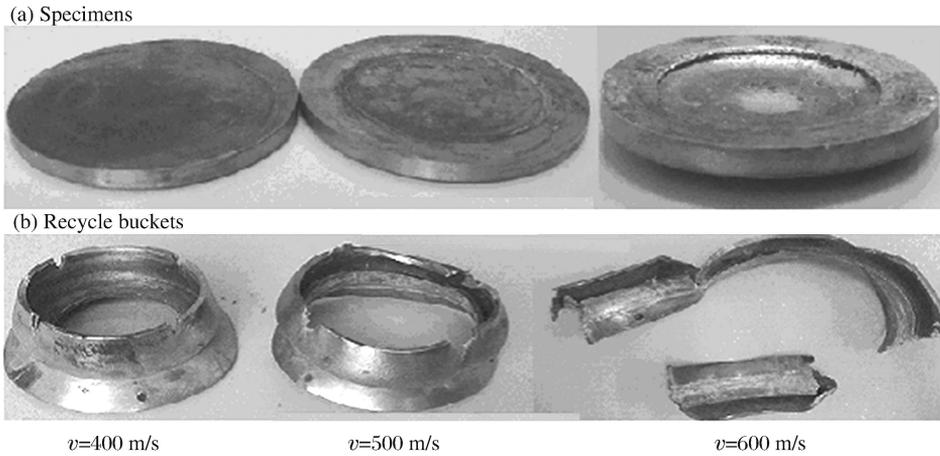


图 2 冲击后回收的样品及样品盒

Fig. 2 Specimens and their settings after shock

3 实验结果及分析

3.1 样品回收

不同的冲击速度对样品形成由弱到强的矩形脉冲,从图 2 中可以看到, Ti6Al4V 合金在中心形成飞片大小的不同程度损伤,样品盒由轻微变形直至完全破裂。在对称碰撞实验中,冲击速度 v 400 m/s 时,合金表面几乎看不出损伤的痕迹,整个样品向冲击方向稍微发生弯曲,样品盒在冲击压缩作用下被压缩,填充在内部的聚碳酸酯发生严重变形;冲击速度达到 500 m/s 左右时,合金表面有明显的损伤面,样品盒被严重压缩撕裂,聚碳酸酯只有少部分可以回收。而在非对称碰撞过程中,由于靶以及靶速的改变,样品完全变形,合金表面可以看到弧形的损伤面,在中心直径约 60 mm 的下凹面,有断裂的趋势。但损伤面并不是光滑的,而是在强剪切作用下呈锯齿形状。材料的损伤不仅与撞击速度有关,也与飞片的材质有关。由于材料的冲击阻抗不同,在样品中形成的冲击压力将有明显的差别,低阻抗材料中的低,高阻抗材料中的比较高。

3.2 SEM 形貌分析

对回收样品受冲击作用的表面进行电镜扫描分析,结果如图 3 所示。由图 3(a)、(b)可以看出,冲击速度为 400 m/s 时, Ti6Al4V 合金样品表面整体来说比较光滑,裂纹较少且比较整齐,出现大量气孔;速度达到 500 m/s 时,样品表面不平整,有明显的剥落痕迹,出现大量细小的裂纹,并且裂纹由一中心点向不同的方向扩展。由图 3(c)非对称碰撞实

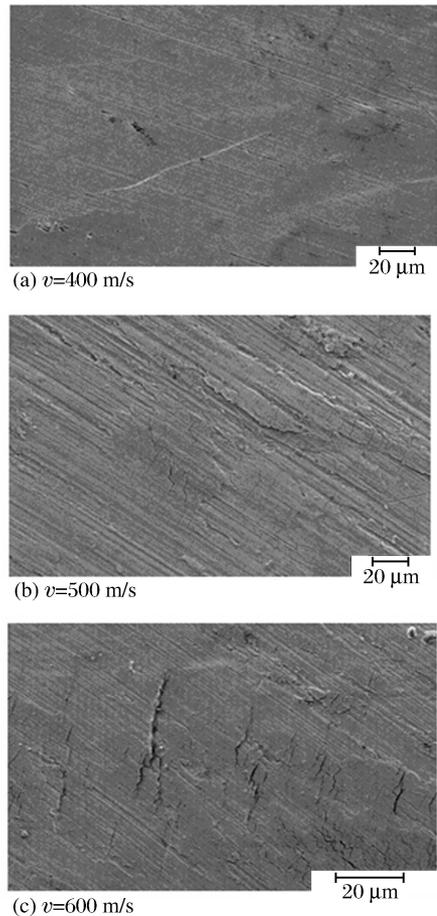


图 3 样品 SEM 形貌分析

Fig. 3 SEM figures of specimens

验样品的表面形貌可知,由于飞片采用 45 钢,而 45 钢的冲击阻抗远高于 Ti6Al4V 合金,在飞片速度为 600 m/s 的冲击下样品受到较大的冲击影响。因此,在样品表面除出现大量明显裂纹外,还可以看到表面有明显的滑移现象,这主要是受冲击作用和靶与样品之间的剪切摩擦作用形成的。而且在每一条较大的裂纹附近都有大量的微损伤区,微损伤区主要由微裂纹与微空穴组成,其范围也随着冲击速度的增大逐渐扩大。微空穴生成的速率以及空穴体积的增长都与拉应力的幅度和作用时间成正比,空穴的继续发展使空穴相互连通,形成微裂纹,微裂纹长大最终形成大的裂纹。

根据最大切线应力准则,裂纹是以裂纹尖端为中心、以固定半径沿最大切线应力方向产生的。裂纹尖端的局部应力可由球面坐标 (r, θ) 表示,如图 4 所示。图中 r 是裂纹尖端到材料切线应力最大值处的距离, θ 是裂纹尖端平面与切线应力最大值处的角度, σ_n 、 σ_z 是裂纹扩展处各个方向的切应力值, τ_{nz} 是裂纹扩展处的剪应力值。切线应力可以定义为

$$\sigma_t = (\sigma_n + \sigma_z)/2 - [(\sigma_n - \sigma_z)/2] \cos 2\theta - \tau_{nz} \sin 2\theta$$

当最大切线应力达到断裂应力 σ_f 时,裂纹开始长大。即,当 $\sigma_t = \sigma_f$ 时,裂纹扩展。因此,临界状态断裂应力也可以由以下公式表示

$$(\sigma_n + \sigma_z)/2 - [(\sigma_n - \sigma_z)/2] \cos 2\theta - \tau_{nz} \sin 2\theta = \sigma_f$$

沿样品中心剖开,经抛光处理后的显微照片如图 5 所示,由图中可以看出,样品内部裂纹的宽度随冲击速度的增大而变大。从微观上分析,动态屈服强度和层裂强度的热软化效应与位错运动的物理机制密切相关。金属材料的塑性变形机理是剪应力驱动位错运动,在动态拉伸条件下导致材料发生层裂的微孔洞长大过程也是由位错发射机制所控制。在 Ti6Al4V 中,孔洞是由于冲击应力在材料内部不同的显微缺陷处产生的剪切强度不同产生的,例如晶粒/晶界面、相的边界、第 2 相粒子或者由绝热剪切高温引起的热软化等位置。X. Teng 等^[12]指出,这些“热缺陷”可以是形变断裂的起点,并且空穴的成核和长大受材料微观缺陷的影响。金属材料中一般都存在空位、缺陷以及晶界等许多位错障碍,根据位错动力学理论,随着温度的升高热激活能使得这些障碍势垒降低,位错可以较容易地克服障碍势垒发生滑移,同时驱动位错运动所需要的应力也将大大减小,从而导致屈服强度和层裂强度随着温度升高而减小。

3.3 物相成分分析

图 6 是 Ti6Al4V 合金冲击处理前、后样品的 X 射线分析图谱。从图中可以看到,冲击前样品中只有 α -Ti、 β -Ti 等 2 种状态,而冲击处理后样品中有 3 种不同的晶体结构: α -Ti、 β -Ti 以及 β' -Ti。由图中 4 条曲线可以看出,对应的衍射峰的强度均有增强,说明在对应晶面中 α -Ti、 β -Ti 等 2 种晶体结构的结晶程度更好,晶面生长更完整。而在冲击处理后的样品中晶面(102)还出现了 β' -Ti 结构,这是在冲击作用后温度降低过程中形成的一种亚稳态结构,它的形成受冷却速率的影响。图中曲线可以分为 2 组,即

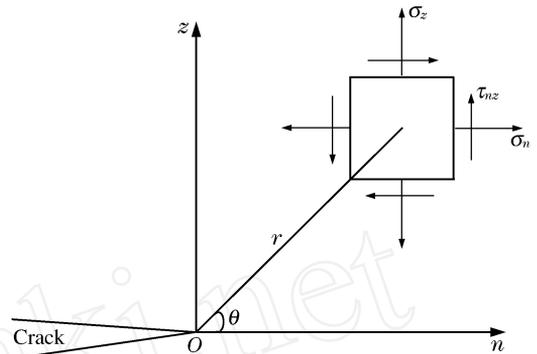


图 4 裂纹尖端处受力
Fig. 4 Stresses at the crack tip

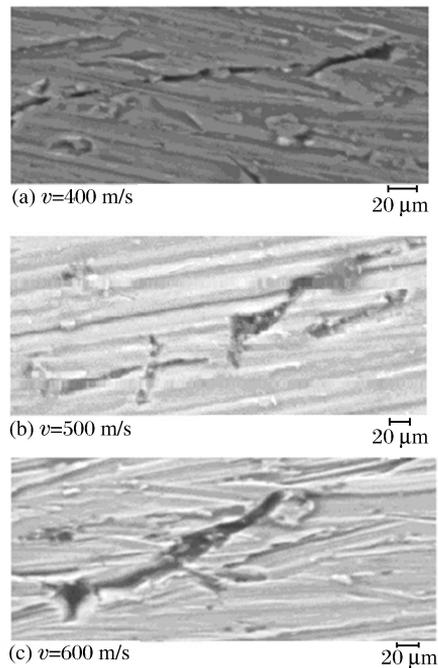


图 5 微裂纹放大图
Fig. 5 Magnified map of the micro crack

对称碰撞曲线 *b*、*c* 和非对称碰撞曲线 *d*。在对称碰撞中所有的对应峰的强度均有所增强,而在非对称碰撞中只有个别峰的强度大幅度增加,这与飞片的材料以及冲击速度有关。在对称碰撞的 2 组曲线中,以晶面(110)为例,由于受冲击作用的影响,晶型长大,晶格排列有序,使晶面长大;而随着冲击作用的加大,剪应力增大,剪切作用增强,微区域内无序度增大,衍射峰强度有所下降。

由图 6 中 XRD 图谱可以看出,冲击后部分衍射峰的宽度增加。造成宽度增加的直接原因:一是由于冲击过程造成样品强烈地塑性变形,二是在冲击过程中飞片与靶样品剧烈的摩擦作用。塑性变形产生的微应力以及晶格点阵的扭曲变形导致了微小区域的无序从而使衍射峰变宽,从而使 α -Ti、 β -Ti 等 2 种峰会有部分的交迭。进一步定量分析可知,在冲击作用下 α -Ti 相的含量并没有变化。

钛合金中由于 α 和 β 相间性能的差异,在相界变形协调时易于产生裂纹并使裂纹扩展。 α 相的强度低于 β 相的强度,故当裂纹扩展到 α 相时, β 相能阻挡裂纹的扩展。当裂纹的扩展方向和 α 相滑移系的方向接近时,在 α 相内产生滑移带;但裂纹扩展的方向和 α 相滑移系的方向不接近时, β 相能使裂纹偏转,使裂纹沿相界面绕行。冲击断裂时,裂纹在 α 相集束和 β 晶界发生大角度偏转,在 α/β 相界发生停滞和偏转,使裂纹扩展路径更曲折,因而,吸收的能量更多。另外,在冷却过程中形成的 α' 相是一种韧性相,当裂纹扩展与之相遇时,要产生塑性变形,消耗较多的能量,从而吸收变形功,松弛应力集中,并使裂纹尖端的曲率半径增大,裂纹尖端钝化,而裂纹尖端钝化时裂纹难以扩展;另外,由于裂纹总是沿着消耗扩展功最少的路径和方式进行,所以当裂纹沿着需要消耗扩展功最大的路径进行时将难以扩展,迫使裂纹改变扩展方向,从而在一定程度上提高冲击韧度。

4 结 论

(1) 不同的冲击速度造成 Ti6Al4V 合金不同程度的弯曲变形。以对称碰撞方式进行冲击,材料发生轻微损伤,而采用密度较大的飞片进行非对称碰撞时,由于受强剪切作用影响,材料以锯齿形式发生形变并断裂。

(2) 材料裂纹的长大受裂纹尖端处切线应力的影响,当 $\sigma > \sigma_f$ 时,裂纹扩展、长大,从而造成材料的断裂。

(3) 适度的冲击作用使材料的晶格长大,结晶程度更好;冲击作用增大时,会有削弱作用。在冲击冷却过程中,材料发生晶型转变,出现亚稳态的 α' 相,在一定程度上提高了冲击韧性。

参考文献:

- [1] 孟祥军. 钛及其军事应用[J]. 现代舰船, 2002(1): 10-13.
MENG Xiang-jun. Titanium and its military applications[J]. Click for Current Issue, 2002(1): 10-13.
- [2] 陈玉勇,孔凡涛. TiAl 合金显微组织细化[J]. 金属学报, 2008, 44(5): 551-556.
CHEN Yu-yong, KONG Fan-tao. Refinement of TiAl alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(5): 551-556.
- [3] Tetsui T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicle[J]. Materials Sciences and Engineering: A, 2002(329-331): 582-588.
- [4] Chen J H, Cao R, WANG G Z, et al. Study on notch fracture of TiAl alloys at room temperature[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(2): 439-457.
- [5] Li Z X, Cao C C. Effects of minor boron addition on phase transformation and properties of Ti-47.5Al-2Cr-2Nb al-

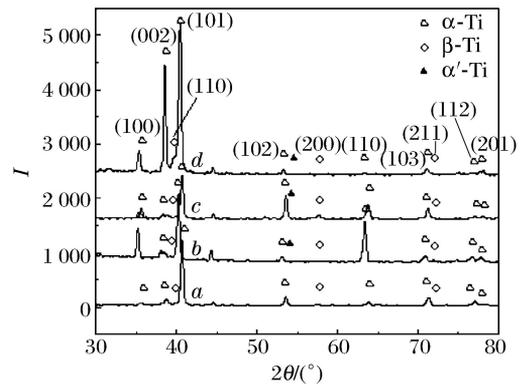


图 6 Ti6Al4V 合金的 X 射线分析图谱

Fig. 6 X-ray diffraction patterns of Ti6Al4V alloy

- loy[J]. *Intermetallics*, 2005, 13(3-4):251-256.
- [6] 张秋平,张永寿. 钛合金用钎焊材料的工艺发展现状[J]. *飞航导弹*, 2005(7):56-63.
ZHANG Qiu-ping, ZHANG Yong-shou. The development of titanium alloy with brazing material[J]. *Cruise Missile*, 2005(7):56-63.
- [7] Puerta Velasquez J D, Bolle B, Chevrier P, et al. Metallurgical study on chips obtained by high speed machining of a Ti-6 wt. %Al-4 wt. %V alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 452-453:469-474.
- [8] Nandy A K, Gowrishankar M C, Paul S. Some studies on high-pressure cooling in turning of Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, 49(2):182-198.
- [9] Venugopal K A, Paul S, Chattopadhyay A B. Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Cryogenics*, 2007, 47(1):12-18.
- [10] Sun J, Guo Y B. A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(8):4036-4042.
- [11] LU Jun-qiang, QIN Ji-ning, LU Wei-jie. Effect of hydrogen on microstructure and high temperature deformation of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composite[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 500(1-2):1-7.
- [12] Teng X, Wierzbicki T, Couque H. On the transition from adiabatic shear banding to fracture[J]. *Mechanics of Materials*, 2007, 39(2):107-125.

Effects of plane shock loading on structure of Ti6Al4V alloy *

WEN Xia¹, YANG Shi-yuan¹, WANG Jun-xia¹, ZHANG Lin², LIU Xiao-nan¹

(1. *Materials Science and Engineering Institute, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;*

2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

Abstract: Ti6Al4V alloy samples were symmetrically and asymmetrically impacted by using a one-stage light gas gun. The recovered samples were analyzed by the scanning electron microscopy and X-ray diffraction. Results indicate that with the increasing of the impact speeds, the samples are distorted to different degrees. Meanwhile, the microcracks induced by the shock wave cause the material damage and the material damage accelerates the production and extension of the microcracks. Furthermore, the X-ray diffraction analysis shows that the impact can improve the crystallization of the material and there forms a metastable structure during the cooling process that can advance to some extent the impact toughness.

Key words: solid mechanics; crystal structure; plane shock; Ti6Al4V alloy; deformation; crack;

* Received 12 February 2009; Revised 17 April 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10476023)

Corresponding author: YANG Shi-yuan, yangshiyuan@swust.edu.cn

(责任编辑 曾月蓉)