

不同组织状态 TC4 合金靶材损伤行为的研究*

张宝友 甄良 李国爱 林琛

(哈尔滨工业大学材料学院, 哈尔滨 150001)

文 摘 采用直径为 4 mm 的 GCr15 钢珠作为弹丸对两种不同组织状态的 TC4 合金进行撞击试验, 撞击速度为 1.5 km/s; 观察撞击后不同厚度靶材的宏观损伤及微观损伤行为。结果表明: 靶材的组织状态对靶材的宏观损伤行为有很大的影响; 时效处理态的组织具有更高的绝热剪切敏感性, 在中厚靶发生了绝热冲塞; 退火态中厚靶的背面则发生了凸起。各种靶材的微观损伤形式基本相同, 在弹坑附近出现了大量的绝热剪切带; 微孔洞在绝热剪切带内形核、长大并连结成为裂纹。

关键词 高速撞击, 绝热剪切带, 绝热冲塞, 微孔洞

Study of Damage Behavior of Different Microstructure TC4 Alloy Targets

Zhang Baoyou Zhen Liang Li Guoai Lin Chen

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The targets of TC4 alloy with two different microstructures are impacted by 4 mm diameter GCr15 steel ball with a speed of 1.5 km/s. The damage behavior of different thickness targets as well as micro damage behavior are observed. Experimental results show that the alloy microstructure has obvious effect on the macro-damage. The microstructure of aged state has more adiabatic shear susceptibility and adiabatic plugging forms in the mid-thickness target. A bulge is observed on the back of mid-thickness target of annealed state. Different targets have always the same micro-damage forms. Abundant adiabatic shear bands (ASBs) are observed near craters. The micro-voids nucleate, grow and coarsen in ASBs, which lead to premature failure.

Key words High velocity impact, Adiabatic shear bands, Adiabatic plugging, Micro-void

1 前言

钛合金因具有密度小 (4.51 g/cm^3)、比强度高、熔点高、耐腐蚀性强、低温变形性能好等特点, 因此在航空、航天、船舶、化工及常规兵器等领域中得到广泛的应用^[1]。而 TC4 合金是目前所有钛合金中应用最多的一种。

在上述服役条件下, 钛合金构件经常承受一些冲击载荷的作用。由于钛合金热传导性能及应变硬

化能力都很差, 在高速变形过程中会产生变形局域化的现象; 而这容易产生绝热剪切带; 绝热剪切带的出现会导致材料承载能力的丧失, 从而导致事故的发生。

目前对钛合金在高应变速率下的变形局域化过程研究得较多^[2~5], 但大多集中在简单剪切或扭转上。对材料在撞击条件下的损伤研究较少, 迄今为止, 有关合金组织状态对宏观损伤的影响的研究还

收稿日期: 2003-10-31; 修回日期: 2003-12-01

*哈尔滨工业大学校基金资助: HIT. 2002. 32

张宝友, 1965 年出生, 硕士, 主要从事高应变速率变形方面的研究工作

未见报道。研究材料不同组织状态在高速撞击条件下所产生的损伤对航天防护设计具有很重要的意义。本文主要通过研究两种不同组织状态 TC4 合金靶材的宏观损伤及微观损伤行为,找出组织状态对宏观损伤及微观损伤的影响,为不同应用环境下 TC4 合金的组织设计提供理论依据。

2 试验

2.1 试样制备

靶材选用直径为 70 mm 的 TC4 合金棒料,其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 TC4 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the TC4 alloy

% (质量分数)								
Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	0.30	0.10	0.10	0.05	0.015	0.15	余量

两种不同组织状态的 TC4 合金分别是最初供货的热锻退火态以及处理后的固溶时效态。合金的热处理工艺为 950 °C 保温 0.5 h 后水淬,然后在 550 °C 时效 2 h 后空冷。试验选用三种不同厚度的靶材,分别为薄靶、中厚靶和半无限靶。通过经验公式确定靶材的厚度为 2 mm、7 mm 以及 14 mm。

2.2 撞击试验

撞击试验在火药炮上进行,采用直径为 4 mm 的 GCr15 钢珠作为撞击粒子,撞击速度为 1.5 km/s。

2.3 组织观察及硬度测量

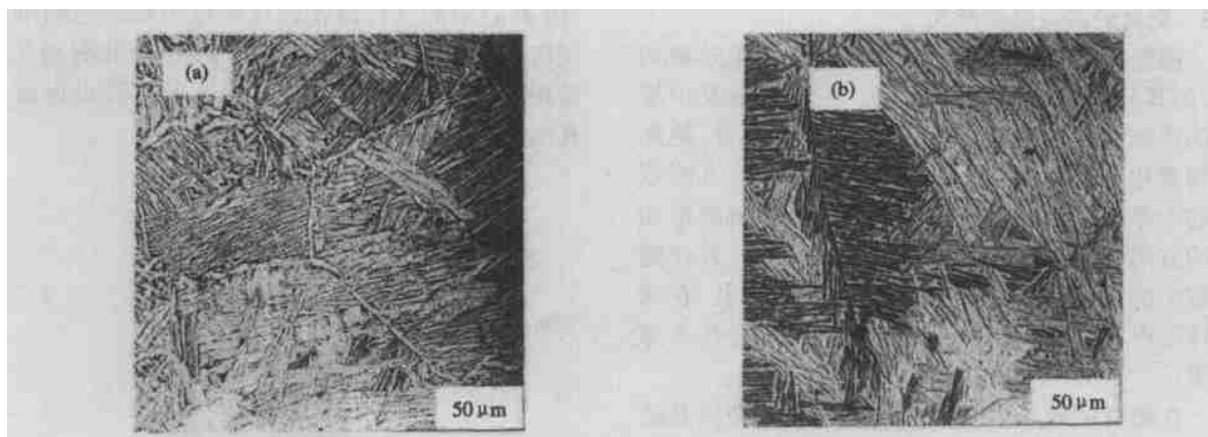
将撞击后产生的弹坑沿中线切开,测量弹坑的坑形参数:弹坑直径 D_c 、弹坑深度 P_c ,然后将弹坑经金相研磨,机械抛光后进行腐蚀。在 OLYMPUS PME3 光学显微镜以及 S-570 型扫描电镜下观察弹坑处微观损伤形貌。

硬度测试在 HB3000 布氏硬度机上进行,选用硬质合金钢球做压头,钢球直径为 $D = 10$ mm,加载 $P = 3$ kN,加载时间 30 s。

3 结果及讨论

3.1 处理后 TC4 合金组织及性能的变化

图 1 显示了处理前后 TC4 合金组织的变化。由图 1 可以看出热锻退火态的 TC4 合金呈现典型的“网篮”状组织,其中条束较短且交错分布。时效处理后组织中出现了比较粗大的针状相,并且条束排布比较规则。组织的变化对材料的力学性能产生了很大的影响,表 2 列出了两种组织合金的力学性能变化。由表 2 可见,合金经固溶时效处理后强度和硬度得到了较大的提高,但是塑性却下降了很多。



(a) 退火态

(b) 时效态

图 1 两种处理状态下 TC4 合金的金相照片

Fig. 1 Optical micrographs showing TC4 alloy after two heat treatment

表 2 两种不同组织状态 TC4 合金的力学性能

Tab.2 Some mechanical properties of TC4 alloy after two heat treatments

热处理状态	0.2	b	HB
	/MPa	/MPa	
热煨退火态	803	896	13.5
固溶时效态	1 133	1 206	5.9

3.2 靶材的宏观损伤形式

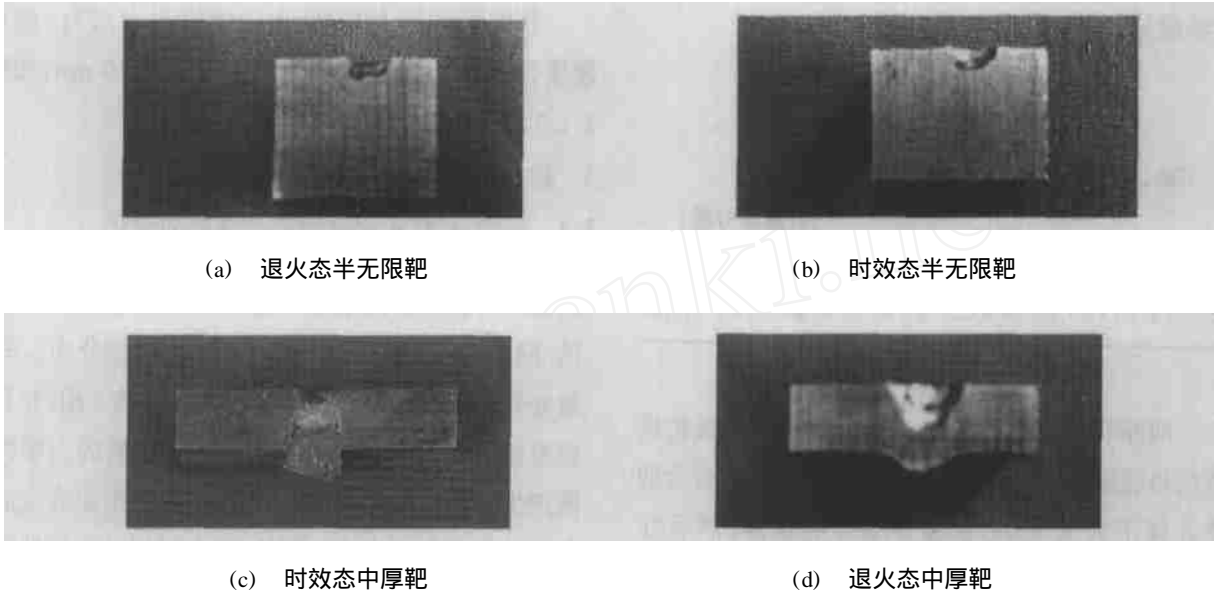


图 2 TC4 合金不同厚度靶材的宏观损伤形貌

Fig.2 Macro-damage profiles of the TC4 target with different thicknesss

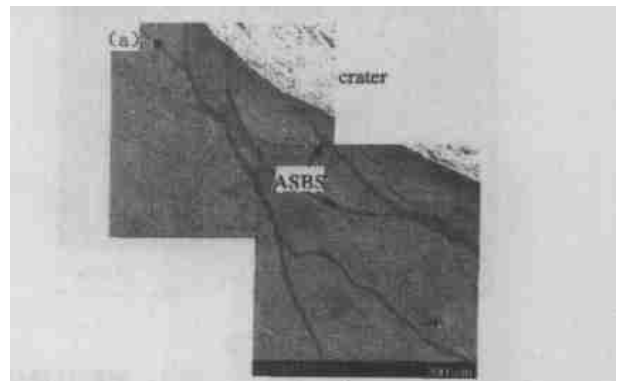
3.3 靶材的微观损伤形式

撞击后每种靶材弹坑附近都出现了绝热剪切带,但其分布位置及密度不同。在半无限及中厚靶的弹坑底部都发现了大量的绝热剪切带,绝热剪切带相互作用呈网状分布[图 3(a,b)]。在时效态的中厚靶中可以发现沿弹坑侧壁与弹坑底部相切的方向形成了向下延伸的绝热剪切带,并伴随有较大的裂纹,形成了绝热冲塞[图 3(c)]。在两种薄靶中,只在弹坑的侧壁出现了很少的几条剪切带。

在靶材的绝热剪切带中都发现了微裂纹及微孔洞。微孔洞的孔壁都比较光滑,从形貌上看微孔洞可以分成两种:一种呈球形或椭球形,另一种呈长条状。其中在弹坑正下方的一般呈现出球形

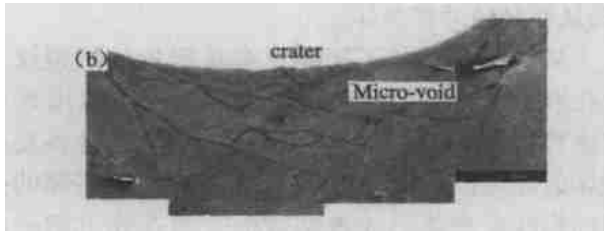
靶材的宏观损伤形式与靶材的性质、厚度都有很大的关系。图 2 显示了两种组织状态 TC4 合金不同厚度靶材的几种损伤形式。通过 P_c 测量可以发现,不同厚度靶材的损伤程度不同,半无限靶形成的 P_c 都比较小,时效态靶材的 P_c 值要小于退火态靶材。时效态的中厚靶在撞击过程中发生了绝热冲塞,而退火态的中厚靶则在背面发生了突起,前者的 P_c 要大于后者。撞击过程中,两种状态的薄靶都发生了穿透。

[图 4(a) 中的 A],而在弹坑侧壁出现的空洞则呈现出椭球或长条状[图 4(b) 中的 B]。孔洞相互连接相成裂纹,部分裂纹的前端还可以看出保留有孔洞的形状[图 4(b) 中的 C]。

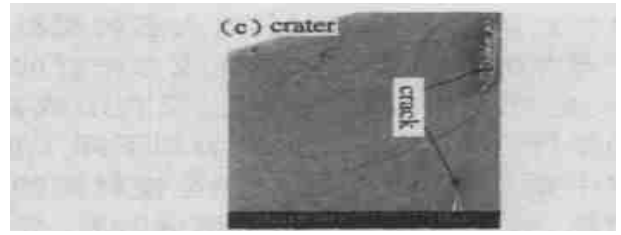


(a) 退火态

宇航材料工艺 2004 年 第 5 期



(b) 弹坑正底部(时效态)



(c) 塞块与基体界面(时效态)

图3 TC4合金中厚靶的微观损伤形貌

Fig. 3 SEM micrographs showing micro-damage for different mid-thick TC4 targets



(a) 退火态

(b) 时效态

图4 TC4合金半无限靶微孔洞形貌

Fig. 4 Optical micrographs showing micro-voids for semi-infinite TC4 targets

4 分析及讨论

在相同的撞击条件下,靶材的宏观损伤行为与材料的强度有关。Fedlman 第一个公布了形成单位体积弹坑消耗的能量 (E/W_c) 同材料的布氏硬度 (HB) 的关系曲线^[6]。可以发现随着材料强度的增加,形成单位体积弹坑消耗的能量逐渐增加。在 TC4 合金半无限靶的损伤过程中,较硬靶材的弹坑深度较小,这与上述的研究结果相同。但是在中厚靶情况却正好相反,主要是较硬靶材发生了冲塞破坏,而较软靶材发生了凸起的缘故。冲塞的形成意味着靶材防护性能的彻底丧失。

在中厚靶撞击过程中,根据撞击时的能量守恒原理,弹丸的动能 (E_p) 可以在撞击过程中转化成以下几部分:靶材变形时所消耗的能量 (W_t), 弹丸侵入靶材时相互摩擦而产生的热量 (Q)、靶材发生冲塞所消耗的能量 (W_s)、弹丸塑性变形功 (W_p)、弹丸的剩余动能 (E_r)。在中厚靶中,撞击过程结束后弹丸都嵌在靶材中,所以弹丸的剩余动能 E_r

为零。同时由于弹坑深度很浅,弹丸在靶材中穿行所产生的热量 Q 可以忽略不计。观察到撞击后弹丸变形量很小,所以 W_p 也可以忽略。这样弹丸的动能可以分成靶材变形能 W_t 以及冲塞形成能 W_s 两部分。即

$$E_p = W_s + W_t \quad (1)$$

根据文献[7]的研究结果,可以发现靶材变形能和材料的屈服强度与均匀变形能力都有关。由于弹坑附近变形区域不是很大,假设两种靶材的变形区域基本相同,那么撞击过程中塑性变形所消耗的能量可以通过下式表示:

$$W_t = A \times \int_0^d \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

TC4 合金变形时加工硬化指数很低,所以塑性变形功可以表示为 $A \times \sigma_b \times \epsilon$ 。由于试样厚度相同,弹丸直径相同,因此可以通过 $\sigma_b \times \epsilon$ 值的大小来

比较两种靶材塑性变形能力。退火态的靶材在撞击过程中弹丸的动能大部分转变成成为靶材的塑性变形功,使靶材背面发生了凸起,没有形成冲塞。时效态的靶材,由于均匀变形能力却下降了很多,撞击过程中弹丸的动能并没有完全被材料的塑性变形所消耗,剩余部分能量用于形成冲塞,导致了塞块的产生[图 2(c)]。对于加工硬化指数比较低的材料来说, n 的值越高,材料在撞击时越不容易发生冲塞破坏。

从图 3 显示的两种中厚靶弹坑底部绝热剪切带的分布情况,可以看出时效态靶材的塞块与基体交界处是由两条带有裂纹的绝热剪切带构成。而退火态靶材的绝热剪切带只是呈网络状分布在弹坑底部。这说明固溶时效处理后靶材的组织具有更高的绝热剪切敏感性,从而在撞击过程更容易发生破坏。产生这种现象的原因与固溶时效处理前后组织的热力学稳定性有关。Kyung - Mox 等人^[8]研究了动态扭转条件下热轧及冷轧 AISI 1018 钢材中绝热剪切带的形成过程,发现材料组织的热力学稳定性对绝热剪切带的形成有很大影响;组织越稳定,在高应变速率条件下变形时越不容易形成绝热剪切带。由于固溶时效热处理后的 TC4 合金组织与经过热处理后的钢材相似,其热力学稳定性要低于热锻退火态,在撞击过程中就更容易发生失稳形成绝热剪切

带,从而导致冲塞破坏。

从图 4 显示的不同靶材弹坑附近的微裂纹与微孔洞形貌,可以发现微裂纹与微孔洞都出现在绝热剪切带内部,证实了绝热剪切带是材料发生破坏的先兆。在图中可以发现在弹坑正底部的孔洞的形状呈现球形或者椭球形。而在弹坑侧壁出现的空洞则呈现出椭球或长条状。

Timothy 等人^[5,9]描绘了孔洞在绝热剪切带中的演变过程。从图 5 显示的绝热剪切带中孔洞的演变过程,可以看出当剪切带中出现拉应力时,孔洞在剪切带中形核,并随着时间的延长而长大;在孔洞边缘到达绝热剪切带边缘之前,孔洞都是球形;当孔洞的生长受到边缘限制时,孔洞拉长呈现椭球状;最终孔洞粗化,相互连接成裂纹[图 5 (a)]。如果在受到拉应力的同时还存在剪应力,那么孔洞将会延长、旋转并呈现长条或者椭球状[图 5 (b)]。通过上面的描述,可以发现在绝热剪切带中出现孔洞的一个先决条件就是要有拉应力的存在。在撞击过程中,只有在撞击的后期出现卸载波的时候在弹坑底部才会出现拉应力。而在此之前绝热剪切带已经形成,所以说孔洞的形成是在绝热剪切带形成的后期出现并发展起来的,这与 Meyers 等人^[10]的研究结果相似。

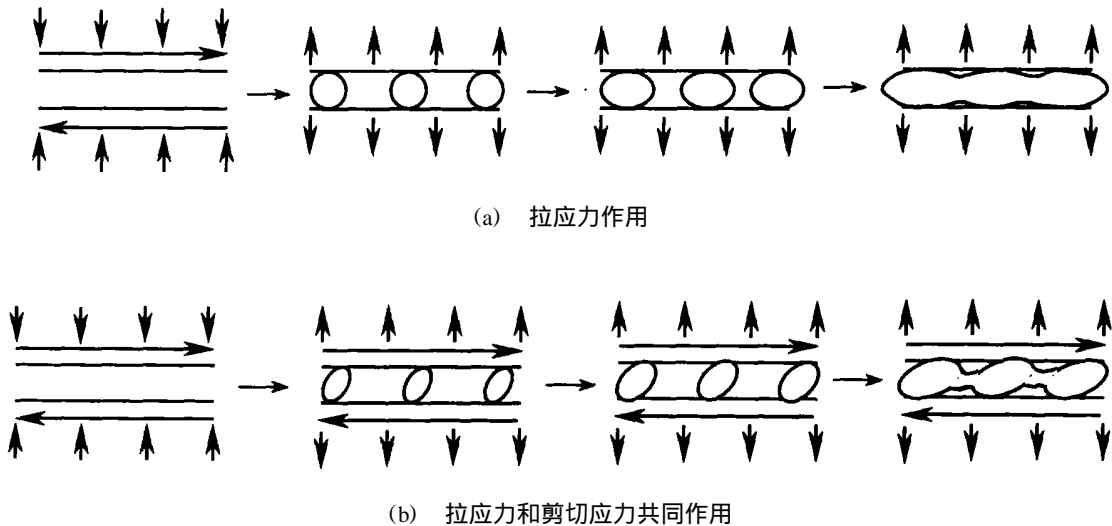


图 5 绝热剪切带中微孔洞演变过程示意图

Fig. 5 Schematic showing void nucleation, growth and coalescence in ASBs

(下转第 57 页)

反应活性,从而使铝合金和复合材料之间的粘接强度得到很大的提高(76.0%),且该化学处理方法对被修复构件没有造成化学污染,不用拆卸工件,可实施原位快速处理,能满足装备损伤构件现场快速原位修复时对其表面处理的要求。

参考文献

1 Baker A A. Fiber composite repair of cracked metallic aircraft component-practical and basic aspects. *Composites*,1987;18(4):293~307

2 Sandow F A. Composite repair of cracked aluminum alloy aircraft structure. AD - A190514

3 Sun C T, Klug J, Arendt C. Analysis of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patches. *AIAA Journal*,1996;34(2):369~374

4 益小苏.叠层胶粘复合材料概论.长春:吉林科学技术出版社,1991

5 盖布 D R.金属表面处理与防护原理.北京:机械工业出版社,1986

(编辑 李洪泉)

(上接第 48 页)

5 结论

(1)靶材的厚度和组织结构对靶材的宏观损伤行为有很大的影响。在半无限靶中,靶材的硬度越高弹坑深度越小。而在中厚靶中,靶材的组织结构对靶材的破坏方式起着重要作用。对于 TC4 合金来说,材料 b_x 的值对撞击过程中发生冲塞破坏的倾向性有很大影响, b_x 的值越大撞击时越不容易发生冲塞。

(2)靶材的组织结构影响了材料生成绝热剪切带的敏感性。固溶时效处理后的组织具有更高的绝热剪切带的敏感性,从而在撞击过程中发生了绝热冲塞,塞块与基体相交处是由带有裂纹的绝热剪切带构成。

(3)靶材的微观损伤形式基本相同,都是由绝热剪切带以及微裂纹、微孔洞组成。微裂纹与微孔洞位于绝热剪切带内部。微孔洞在绝热剪切带形成后期形核、长大并最终形成微裂纹。

参考文献

1 李文平.钛合金的应用现状及发展前景.轻合金加工,2002;30(5):53

2 李强,徐永波,白以龙等.钛合金(Ti-17)的动力学

性能和损伤特性.金属学报,1999;35(5):491

3 禹金强,周惠华,沈天乐等.Ti-55合金中的热塑绝热剪切带.金属学报,1999;35(4):379

4 胡八一,董庆东,韩长生等.TC4钛合金及40Cr钢破片中绝热剪切带的TEM分析.高压物理学报,1996;10(1):37

5 Timothy S P, Hutchings I M. The structure of Adiabatic shear bands in a titanium alloy. *Acta Metall*, 1985; 33(4): 667

6 Feldman J B. Volume-energy relation from shaped charge jet penetration. In: Proceeding of 4th Symposium on Hypervelocity Impact, Elgin Air Force Base, Fla. April, 1960: 26

7 陈立,李永池,王礼立.长杆弹对钛合金靶的冲塞实验研究.爆炸与冲击,1994;14(3):217

8 Cho Kyung Mox, Lee SungHak, Nutt S R et al. Adiabatic shear band formation during dynamic torsional deformation of an HY-100 steel. *Acta Metall. Mater*, 1993; 41(3): 923

9 Timothy S P. The Structure of adiabatic shear bands in metals: a critical review. *Acta Metall*, 1987; 37(2): 301

10 Xue Q, Meyers M A, Nesterenko V F. Self-organization of shear bands in titanium and Ti-6Al-4V alloy. *Acta Mater*, 2002; 50(3): 575

(编辑 李洪泉)