

TC4钛合金自然破片的引燃机理分析

胡八一 董庆东 韩长生 张明

(中国工程物理研究院流体物理研究所 成都 610003)

摘要 对两种热处理条件不同的TC4钛合金圆筒在内部爆轰加载下的自然破片形成过程作了研究,并对破片的宏观断裂特征和微观断裂机理进行了分析。研究表明,一些引燃战斗部采用钛合金壳体的根本原因在于利用壳体破裂时形成的高温绝热剪切带和钛元素本身在高温下的剧烈氧化性。

关键词 TC4钛合金 自然破片 引燃效应 绝热剪切带

中图分类号 TG146.23 TJ760.3

1 引言

在常规战斗部壳体的设计中,自然破片壳体因其普适性和工艺简单而较早和较多地受到人们的重视。随着武器的发展,人们对它的综合破坏威力有了更多和更高的要求,如在穿甲破坏的同时,还要求具有引燃效应^[1]。因此,这类战斗部的设计一般是将铈、锆、钎及混合稀土金属等易燃材料制成颗粒或环状置入壳体内^[2]。

80年代以来,有些导弹战斗部却直接采用钛合金作为壳体材料,用它破碎时产生的自然破片来攻击飞机等易燃目标,因为人们早已认识到钛破片具有引燃效应^[3]。可是钛合金破片引燃效应的内在物理机制是什么,本文即给出我们研究这一问题的部分实验结果及初步认识。

2 实验及结果

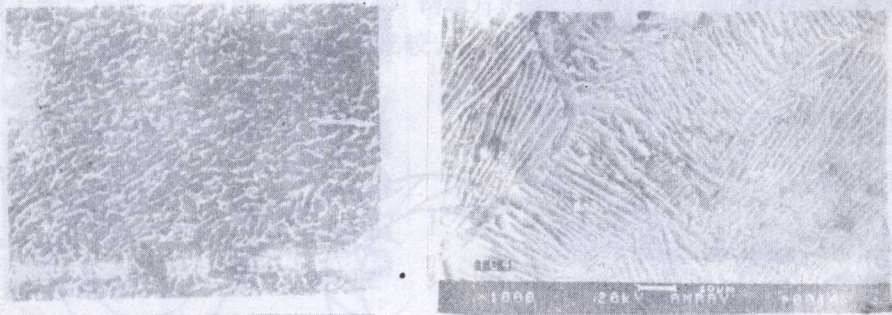
将两种TC4钛合金棒加工成长220 mm,内径32 mm,壁厚7.8 mm的圆筒,其金相组织见图1。图1(a)为双重退火的细小等轴组织,图1(b)为晶粒粗大的魏氏组织。

加载炸药是JO-9159和RDX/PVB=55/45,其爆压分别为36.8 GPa和4.8 GPa,密度各为1.86 g/cm³和0.83 g/cm³。用文献[4]中的破片软回收法,将回收破片进行细致观察、比较,并对典型破片横截面上的变形和断裂进行SEM分析。

结果发现,对等轴组织的钛合金,当加载炸药由JO-9159变为RDX/PVB时,即壳体应变速率由 10^4 s^{-1} 降至 10^2 s^{-1} 时,破片仍全部以剪切断裂的方式形成,断口光洁明亮。用JO-9159加载时,部分破片的剪切断裂面呈紫蓝色,明显呈高温强氧化的特征。但对魏氏组织的钛合金,不论是JO-9159加载,还是RDX/PVB加载,壳体均以拉伸断裂的方式解体,即

中国工程物理研究院科学基金资助项目。

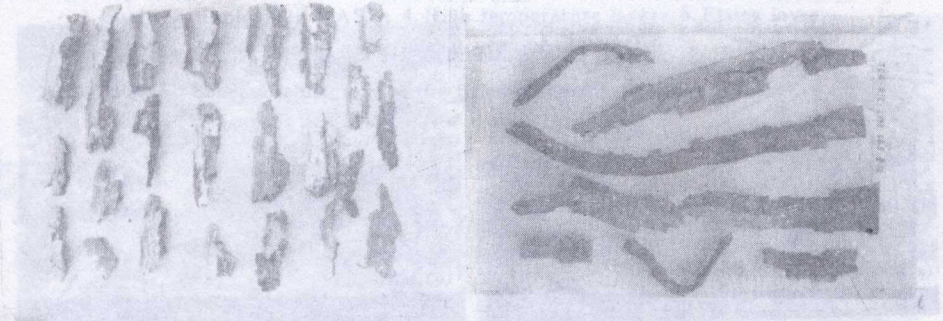
1995年1月3日收到原稿,3月6日收到修改稿。



(a) 等轴组织 (a) Equiaxial structure (b) 魏氏组织 (b) Widmanstatten structure

图 1 TC4 钛合金的原始金相形貌

Fig. 1 Micrograph of the Ti-6Al-4V before loading



(a) 拉伸断裂 (a) Tensile fracture (b) 剪切断裂 (b) Shear fracture

图 2 两种 TC4 钛破片的宏观断裂特征

Fig. 2 The macro-characteristics of Ti-6Al-4V fragments

便少数破片沿最大剪应力方向剪切断开,但断口仍极粗糙、灰暗。图 2 即是这两种钛破片的宏观断裂特征比较。

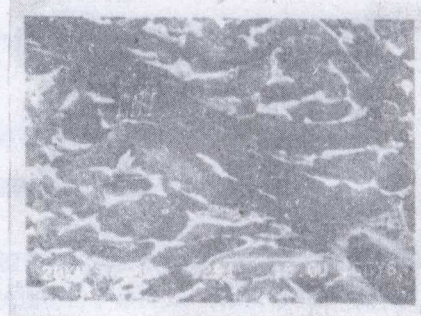
破片的横截面 SEM 分析表明,对等轴组织的 TC4 钛合金,壳体的断裂完全是由绝热剪切带(ASB)的形成所致。其机理是炸药爆炸产生的巨大静水压作用于已屈服的壳体上,壳体材料沿最大剪应力方向首先失稳,从而在内表附近萌生了大量 ASB,这种 ASB 迅速向外表传播,使壳体材料相互间产生剪切滑移运动,并在环向拉应力作用下造成 ASB 的分离,形成了破片的宏观剪切断裂表面。图 3(a)即是这种 ASB 的宏观分布情况,图 3(b)则是其微观特征。从上可看到 ASB 曾经完全熔化过,带上晶粒呈河水急流状,表明材料失稳产生的塑性功使带上温升已超过 TC4 的熔点(1650℃)

魏氏组织的 TC4 钛破片中则没有发现任何绝热剪切带的现象。为便于下面分析讨论,我们将相关实验中的 TC1 和 TA6 钛破片截面金相照片列于图 4 中 从中可见 TC1 和 TA6 钛合金破片中的 ASB 属变形型,显然带上温升未达到其熔点。这充分证明了双重退



(a) 宏观特征

(a) Macro characteristics



(b) 细观特征

(b) Meso characteristics

图3 TC4钛合金中的ASB特征

Fig. 3 The characteristics of ASB in Ti-6Al-4V

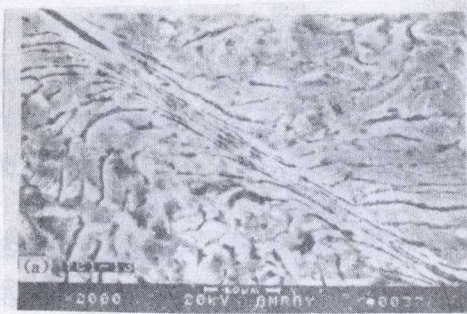


图4 TC1(a)和TA6(b)钛合金中的ASB

Fig. 4 The ASB in TC1(a) and TA6(b) titanium alloys.

火的TC4钛合金在众多金属及合金中是对绝热剪切最为敏感的材料之一^[5]。

3 分析及讨论

现在即可分析某些对空导弹战斗部采用退火态的TC4钛合金作为壳体破片材料的内在物理原因了。从力学上讲,它具有较好的强度和韧性,能很好地吸收爆轰产物的能量;更主要地是在物理性质上,它对绝热剪切极敏感,破片断裂面主要由ASB的滑移和分离形成,故断口表面温度至少超过其熔点,王彦平^[6]曾记录到这种钛合金的ASB发光。而其它热处理条件下的TC4钛合金及图4中所示的TC1和TA6等合金因绝热剪切的剧烈程度不及它而达不到上述温度。同时,在高温下它有良好的氧化性,钛还是唯一能在 N_2 中剧烈燃烧的金属。因此如图5所示,壳体碎裂后,破片表面必然形成自持的高温火焰燃烧层,当它击中易燃性目标时,则会造成除动能破坏以外的引燃效应。

其实还存在许多与TC4钛合金类似的金属,如与Ti同族的Zr、Hf,镧系元素Ce、Nd和钢系元素,U^[7]、Pu^[8]等。基于这种认识,我们不难想到对一些经济常用的钢材或合金作

适当的热处理,使它们对绝热剪切更敏感,则壳体碎裂时破片表面温度更高,Backman^[9]等人的工作已证明了这一点。我们对 45# 钢破片的研究亦如此^[10],图 6 即是正火态(a)和调质(b)后 45# 钢破片的主要形成机制比较。

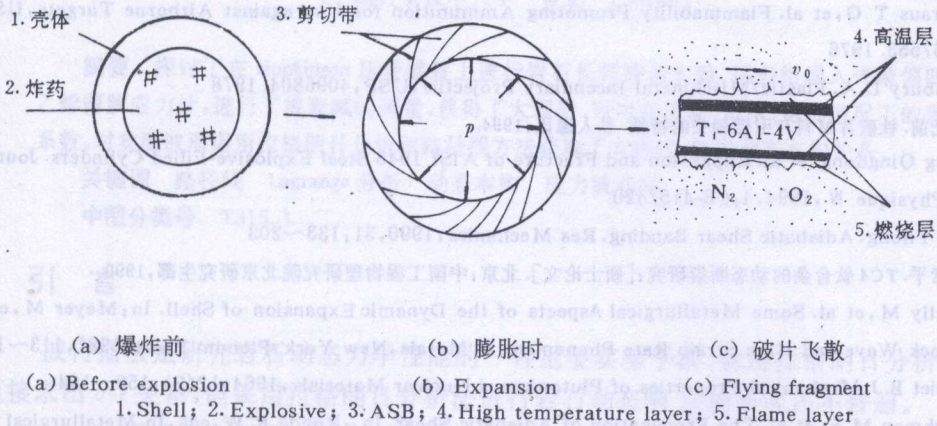
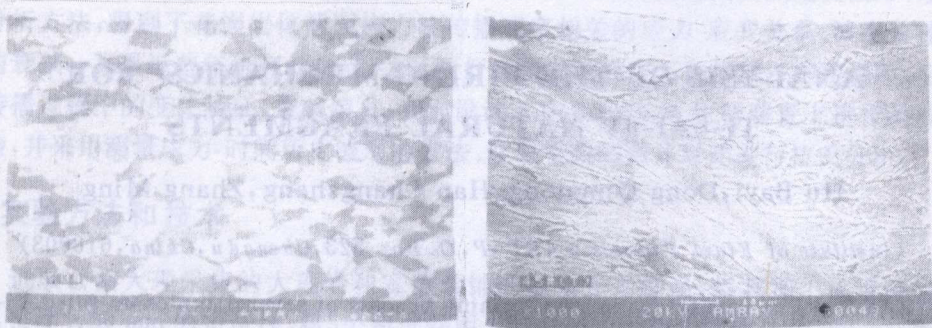


图 5 引燃破片的形成过程

Fig. 5 Schematic diagram of the firing-fragments forming process



(a) 变形 ASB (b) 相变 ASB
 (a) Deformed ASB (b) Transformed ASB

图 6 45# 钢中的绝热剪切带

Fig. 6 ASB in AISI 1045 steel

4 结论

通过宏观、细观相结合的实验研究及物理分析,我们得到如下几点认识:

(1) 战斗部壳体的碎裂是一个极其复杂的动力学过程,它与材料的冶金学特性、物理化学性质密切相关. TC4 钛合金自然破片的引燃机理就在于利用壳体高速变形时形成的高温绝热剪切带和钛、铝等元素在高温下的剧烈氧化放热反应。

(2) 在设计对付飞机、车辆、舰船及大型厂矿和化工基地这类含燃油及易燃性气体等目标的战斗部时,可在元素周期表中的 III B、IV B 族及镧、铈两系稀土金属中寻找壳体材

料。若从经济等综合角度考虑,对某些弹头材料进行适当的热处理,使其对绝热剪切更敏感,这样产生的壳体破片也可具有或接近上述过渡及稀土合金破片的引燃效果。

参 考 文 献

- 1 Keraus T G, et al. Flammability Promoting Ammunition for Use against Airborne Targets, USP, 3967553. 1976
- 2 Bilsbury D A. Plastic/Mischmetal Incendiary Projectile, USP, 4096804. 1978
- 3 周光前. 钛破片材料与引燃相关的特性. 私人通讯, 1994.
- 4 Dong Qingdong, et al. Expansion and Fracture of AISI 1045 Steel Explosive-Filled Cylinders. *Journal de Physique N*, 1994, 4: C8-415/420
- 5 Bai Yilong. Adiabatic Shear Banding. *Res Mechanica*, 1990, 31: 133~203
- 6 王彦平. TC4 钛合金的动态断裂研究: [硕士论文]. 北京: 中国工程物理研究院北京研究生部, 1990
- 7 Stelly M, et al. Some Metallurgical Aspects of the Dynamic Expansion of Shell. In: Meyer M, eds, *Shock Wave and High Strain Rate Phenomena in Metals*, New York: Plenum Press, 1981, 113~125
- 8 Spriet B J. Mechanical Properties of Plutonium. *J Nuclear Materials*, 1964, 12(2): 159~164
- 9 Backman M E, et al. The Propagation of Adiabatic Shear. In: Rohde R W, eds, *In Metallurgical Effects at High Strain Rates*, New York: Plenum Press, 1973: 531~543.
- 10 胡八一, 等. 爆炸金属管绝热剪切断裂的细观研究. *爆炸与冲击*, 1993, 13(4): 305~312

ANALYSIS OF THE FIRING MECHANICS FOR Ti-6Al-4V NATURAL FRAGMENTS

Hu Bayi, Dong Qingdong, Han Changsheng, Zhang Ming

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu, China, 610003*)

ABSTRACT The natural fragments forming process of several explosive-filled Ti-6Al-4V cylinders are studied. The macro-fracture characteristics and the meso-fracture mechanism of the fragments are also analysed. The results show that the fundamental reason of the Ti-6Al-4V used as warhead shell material in some of missiles lies in taking advantage of the adiabatic shear banding during the shell fracture and the violent oxidation of the titanium in high temperature.

KEY WORDS Ti-6Al-4V, natural fragments, firing effect, adiabatic shear band