

TC4 钛合金板抗高强杆弹正撞击侵彻特性实验研究^{*}

EXPERIMENTAL STUDY ON BALLISTIC RESISTANCE PROPERTY OF TC4 TITANIUM ALLOY PLATE AGAINST HIGH STRENGTH ROD PROJECTILES

杨永刚^{**1} 冯岩² 魏刚^{***2} 邓云飞²

(1. 中国民航大学 通航学院, 天津 300300)

(2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

YANG YongGang¹ FENG Yan² WEI Gang² DENG YunFei²

(1. College of General Aviation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(2. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

摘要 为了研究高速撞击下 TC4 钛合金平板的损伤行为及弹头形状对其抗侵彻性能的影响,利用轻气炮加速装置,对 10 mm 厚钛合金平板进行了杆弹正撞击侵彻实验,得到了两种弹体撞击下靶板的弹道极限和损伤形貌,并结合微观观察对靶板的损伤特性和机理进行了分析。结果表明 10 mm 厚度 TC4 靶板,平头弹和卵形弹撞击后的破坏形式有明显的不同,且对卵形弹的抗弹性明显优于对平头弹。卵形弹撞击后靶板损伤为正面开孔,背面剥落,破坏模式为花瓣型破坏。平头弹撞击后靶板为剪切冲塞型破坏,且弹孔边缘整齐,内壁光滑。此外使用扫描电子显微镜观察到了平头弹侵彻靶板时产生的绝热剪切带,绝热剪切带的产生意味着靶板防护能力大大降低。

关键词 TC4 钛合金 弹道极限 失效模式 失效机理 绝热剪切带

中图分类号 O347 O385

Abstract The test of rod impact on TC4 titanium alloy plate with a thickness of 10 mm was carried out on a light gas gun, in order to study the damage behavior and the effect of projectile head shape on the anti-penetration performance of the target plate. The ballistic limit velocities of target plates were obtained under various impact conditions. The damage characteristics and mechanism of target plate were analyzed by microscopic observation. The results show that the failure modes of TC4 plates are different when impacted by blunt-nose projectile and ogival-nose projectiles, and the anti-penetration capability of target to ogival-nose projectile is better than that of blunt-nose projectile. After impacted by ogival-nose projectile, the front perforated and the back peeled off of targets were observed, as well as the shape of the back perforation is approximately conical. However, the damage of the target plate is shear plug type, accompanied by the neat edge and smooth inner wall of the impact hole. In addition, the adiabatic shear bands were observed by scanning electron microscope when the blunt-nosed projectile penetrated the target plate.

Key words TC4 titanium alloy; Ballistic limit; Failure modes; Failure mechanism; Adiabatic shear band

Corresponding author: WEI Gang, E-mail: weigang.hit@gmail.com, Tel: +86-22-24092414

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11702317), and the Research Funds for the Central Universities of China (No. 3122017022).

Manuscript received 20200724, in revised form 20200811.

引言

钛合金具有一系列优异的性能,例如强度高、韧性

好、密度小、抗腐蚀性能以及抗冲击性能良好等^{[1]198-203}。钛合金装甲与装甲钢相比,同等防护力条件下可使结构质量减轻 30% 以上;与铝合金装甲相

^{*} 20200724 收到初稿, 20200811 收到修改稿。国家自然科学基金青年基金 (11702317), 中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项 (3122017022) 资助。

^{**} 杨永刚, 男, 1978 年生, 吉林四平人, 中国民航大学教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为飞行器制造技术。

^{***} 魏刚 (通信作者), 男, 1987 年生, 山西古县人, 中国民航大学讲师, 博士, 研究方向为冲击动力学和材料动态力学性能测试。

比,同等质量可以提高防护力 30% 以上,因而成为世界各装甲强国为减轻整车质量和提高防护能力所广泛采用的装甲材料^{[2]392-397}。由于有许多适用于飞行器的宝贵特性,自从上世纪五十年代起,钛合金已逐渐成功应用于航空业中了。从资源储存方面来看,钛合金仅次于铁、铝、镁,是处于第四位的富有资源,所以钛合金很有希望成为继铁、铝之后的第三种实用金属,开发利用前景十分广阔^[3]。

为研究高速撞击下 TC4 钛合金平板的损伤行为和弹道极限特性,惠旭龙,刘小川等^[4]利用 Ls-Dyna 软件开展了不同的弹头形状、平板厚度、撞击角度等因素对 TC4 平板撞击损伤形式影响的数值仿真研究。周伟等^[5]采用一种钛合金靶材进行穿甲侵彻实验,通过弹坑解剖分析钛合金靶板穿甲破坏形貌,发现裂纹沿绝热剪切带萌生、扩展,形成了沿整个绝热剪切带的大裂纹,最终在穿孔表面形成碎片,从靶板上脱离,造成靶板的破坏。余东辉等^{[1]198-203}针对四种铸造态钛合金 β 20C、TC4、TA15 和 TA18 开展了力学性能及抗弹性能的研究,发现抗弹性能最强的 β 20C 的动态压缩强度、准静态抗压强度、准静态拉伸屈服强度和准静态抗拉强度的值均为四种合金中最高。Singh B B 等^[6]对不同热处理状态下得到的不同组织的 Ti6Al4V 靶板进行打靶试验,结果表明,具有等轴组织的钛合金靶弹坑最宽且最深,靶板背面有呈环状的裂纹;而片层组织的钛合金靶板背面有少量的裂纹;双态组织的钛合金靶板弹坑最浅,直径最小,背面无凸起和裂纹。Zheng C 等^[7]用 12.7 mm 的穿甲弹对 Ti6Al4V 进行了穿甲试验,建立了 Ti6Al4V 钛合金靶板的微观特征与损伤机理之间的联系,研究结果表明,在等轴组织中,绝热剪切带的规则间隔传播特征促进了靶板延性扩孔的破坏机制,而在片层组织中,绝热剪切带的网状传播特征促进了脆性断裂的破坏机制。Zhang T 等^[8-9]以 TC4 为靶板,以 TA11 平板叶片为弹体,通过弹道实验和数值仿真研究发现,在冲击作用下,平靶板和带有弧度的靶板的失效情况类似,都是整体的碟形变形和局部韧性撕裂。当弹体射孔或贯穿时,失效形式为冲塞(剪切)和花瓣开裂(剪切),当弹体反弹时为弹坑(剪切)。张铁纯等^[10]通过数值仿真发现 TC4 平头弹撞击不同厚度 TC4 钛合金靶板,在 4 mm~8 mm 厚度范围内,出现了弹道极限随厚度几乎不变的现象;他们认为,随着厚度的增加,靶板失效模式可能由剪切冲塞向绝热剪切冲塞过渡,而绝热剪切对靶板弹道性能的影响极其显著,在特定的速度区间内,两种失效模式可能共存并相互影响,从而导致出现了弹道极限随厚度不再单调增加的特殊现象;但他们在数值仿真中,只通过实验验证了 2 mm 厚度靶板的数值仿真结果,厚板穿甲仿真与

实验结果是否吻合并没有完全证明。郑超等^[11]针对 Ti6Al4V 钛合金材料,开展了厚度为 10 mm~30 mm 的单层板及等厚度的 30 mm 总厚度双层板的终点弹道侵彻实验,研究了厚度和层间界面对 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的影响规律,结果表明,靶板抗弹性能随着厚度的增加逐渐提高,层间界面不利于 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的提高,厚度为 30 mm 的单层板的抗弹性能优于 (15+15) mm 双层板,但他们的研究只关注了同一撞击速度下,不同靶板的剩余速度这一指标,并没有给出弹道极限速度。

综上所述,国内外学者对钛合金的抗弹性能做了一些理论、实验、仿真的研究,但是,主要集中在两个方面:第一,从损伤形态、抗冲击性能、组织性能的角度,研究钛合金的冲击宏观损伤类型和失效机制;第二,从微观结构演化的角度出发,探寻不同成分、组织的钛合金的宏、微观损伤形态和分布规律^{[2]392-397}。对于弹体头部形状对钛合金板(尤其是中厚度板)的抗侵彻性能的影响报道较少,有少数研究也仅仅是利用有限元软件进行仿真,尤其缺乏实验的探究。本文通过实验研究高速撞击下 TC4 钛合金平板(10 mm 厚)的损伤行为及弹头形状对其抗侵彻性能的影响。使用平头弹和卵形弹两种弹体对钛合金平板进行了杆弹正撞击侵彻实验,得到了不同撞击条件下弹体的初始-剩余速度曲线和靶板的弹道极限,结合微观观察,对靶板的损伤特性进行分析,揭示弹头形状对钛合金靶板抗侵彻能力影响机理。

1 实验系统与方法

实验用靶板材料为 10 mm 厚度 TC4 钛合金方板,尺寸为 100 mm×100 mm,靶板通过 4 个螺栓与靶架固定。靶板材料单向拉伸试验按“金属材料室温拉伸试验方法(GB/T228.1-2010)”进行,采用板状拉伸试样,准静态拉伸试验速度 2 mm/min,标距段长度 40 mm,名义应变率 $8.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,工程应力应变曲线及对应的试件断口形式如图 1 所示,屈服强度在 940 MPa 左右。使用名义直径 12.65 mm,名义质量 50 g 的平头和卵形头杆弹,其中卵形弹的弹头尺寸为 CRH3(卵形头半径与弹身直径之比为 3)。

撞击实验在一级轻气炮上完成,整体设置如图 2,本研究中弹体的速度范围在 160 m/s~320 m/s。撞击过程采用高速相机监控,同时可以测得弹体的初始速度和剩余速度。控制初始撞击速度范围,使大多数弹体速度在弹道极限(临界贯穿)附近。弹体材料是高强度钢,撞击后弹体均无明显塑性变形。

图 3 分别给出了两种弹体撞击靶板的高速摄影过程。可以观察到弹体即将撞击靶板的姿态,弹体并没

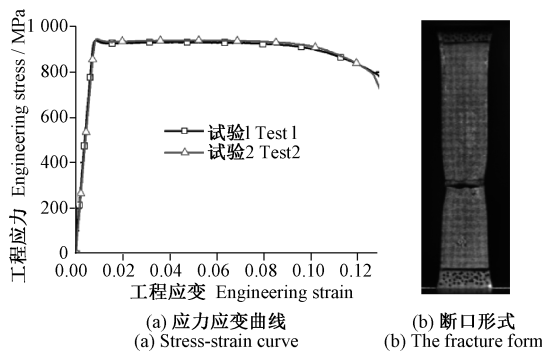


图 1 TC4 单向拉伸应力应变曲线及对应断口形式

Fig.1 Uniaxial tensile stress-strain curve and the fracture form of TC4 specimen

有明显的攻角。平头弹在侵彻后靶板只产生了一个和弹体直径大小相近的冲塞;而卵形弹侵彻之后,靶板后部产生了较多的碎片。图 3 中还可以看到,弹体侵彻靶板过程中会产生刺眼的亮光,这会对高速相机的正常工作造成严重的干扰。为了减小这种干扰,实验中在不影响精度的情况下,均在靶板背部放置了不透明的塑料布。

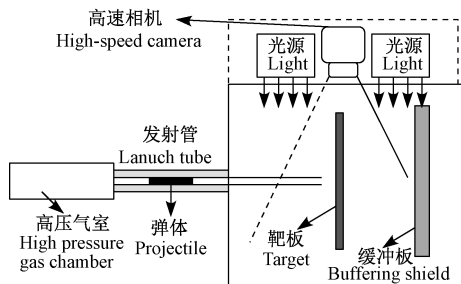


图 2 撞击实验设置示意图

Fig.2 Schematic of impact experimental setup

2 实验结果及分析

本研究中,平头弹和卵形弹分别进行了 10 发和 7 发弹道实验。表 1 给出了弹体撞击 TC4 钛合金靶板的初始、剩余速度以及损伤特征等数据,其中, m_p 为弹体质量, d 为弹体的直径, m_{pl} 是冲击后收集到的碎片或者塞块的质量, V_i 为弹体的初始撞击速度, V_r 为弹体贯穿靶板后的剩余速度, S_1 是撞击后靶板正面(迎弹面)弹坑的面积, S_2 是靶板背面碎片剥落区域或冲塞后留下的锥形弹坑区域的面积。

剩余速度-初始速度的关系使用 Recht R F 和 Ipson T W^[12] 提出的经验公式拟合实验数据给出

$$V_r = a(V_i^p - V_{lp}^p)^{1/p} \quad (1)$$

式中, V_{lp} 为弹道极限速度, a 和 p 为待定常数。弹道极限速度 V_{bl} 是指弹体刚好穿过靶板,并且剩余速度为零时所对应的弹体初始撞击速度,通过最小二乘法拟合剩余-初始速度实验数据所得的曲线与 x 轴相交得到。

最终得到,平头弹, $a = 0.78$, $p = 2$, $V_{bl} = 180$ m/s; 卵形弹, $a = 0.9$, $p = 2.3$, $V_{bl} = 278$ m/s, 拟合曲线如图 4 所示。

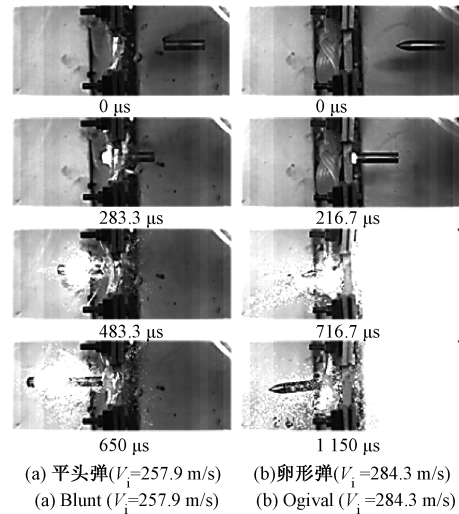


图 3 两种弹体穿透 TC4 钛合金靶板过程

Fig.3 Perforation of TC4 Titanium alloy plates by two kinds of projectiles

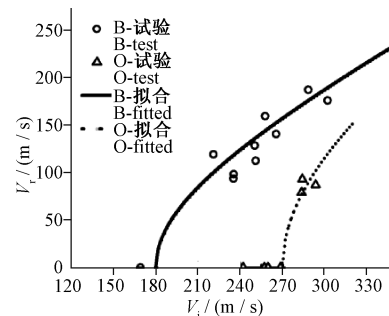


图 4 平头弹和卵形弹撞击 TC4 钛合金板的剩余-初始速度拟合曲线

Fig.4 Residual-initial velocity curves for TC4 Titanium alloy plates impacted by blunt and ogival projectiles

3 损伤特性分析

图 5 给出了两种弹体侵彻靶板后的损伤形貌,其中图 5a 为平头弹撞击情形,弹体冲击出来的塞子表面平整,直径与弹体的直径相近,贯穿后留下的孔正面边缘整齐,靶板背面的损伤形式为环状凸起并有少数裂纹。需要说明的是,平头弹以不同速度贯穿后靶板损伤形式基本一致,因此仅给出了一个靶板的损伤照片。图 6 给出了平头弹贯穿后靶板的剖面放大图,可以看到,弹孔表面发亮,整体较为光滑,同时塞块完整,在光学显微镜下可以观察到大量细小裂纹,这些特征均表明靶板可能发生了绝热剪切现象。然而通过对冲塞的观察,发现在塞块背部(未与弹体接触的部位)边缘有较明显的材料拉伸的现象,说明平头弹侵彻靶板时并

不只发生剪切破坏,同时还伴随有一定拉伸撕裂破坏,但拉伸破坏在整体的失效中所占比例相对较小。整体来看,平头弹侵彻靶板时主要的破坏模式应该是剪切破坏。

当弹体为卵形弹时,在图 5b、图 5c、图 5d 中都可以观察到,靶板正面撞击孔的边缘有明显的翻唇现象,这可能是由于在侵彻过程中靶板撞击区域产生剧烈的塑性变形,转化为材料的温升,使靶板局部达到了较高的温度,造成了材料软化。在弹体的挤压下,热软化的

金属产生了塑性流动,造成了这一翻唇现象(图 6)。同时,弹孔内壁不光滑,结合图 7a,可以观察明显的材料层状重叠的现象,这可能是由于弹体在对靶板扩孔的同时不断挤压靶板造成的。在弹体速度低于弹道极限时,靶板的背面可以观察到明显的花瓣型,如图 5d,由于靶板背面材料难以承受环向应变而导致撕裂,形成花瓣型破坏,当弹体撞击速度超过弹道极限后,弹体在穿孔的过程中始终在挤压“花瓣”,由于材料韧性有限,花瓣发生断裂最终形成碎片。

表 1 打靶试验结果

Tab.1 Ballistic test results

弹体形状 Projectile shape	编号 No.	m_p/g	m_{pl}/g	d/mm	$V_i/(m/s)$	$V_r/(m/s)$	S_1/mm^2	S_2/mm^2	备注 Remarks
平头弹 Blunt	B1	49.9	5.1	12.65	302.9	176.0	184.9	171.6	穿 Through
	B2	49.9	3.1	12.65	288.5	187.2	172.9	156.2	穿 Through
	B3	49.9	3.9	12.66	265.6	140.7	167.7	163.8	穿 Through
	B4	50.0	3.2	12.66	257.9	159.5	163.5	158.5	穿 Through
	B5	50.0	5.1	12.65	251.1	128.5	167.7	156.2	穿 Through
	B6	49.9	5.2	12.65	250.5	112.5	170.3	161.3	穿 Through
	B7	50.0	4.7	12.63	235.4	93.6	169.0	161.3	穿 Through
	B8	49.9	3.8	12.64	235.3	98.3	176.8	172.9	穿 Through
	B9	50.0	5.1	12.66	221.1	119.2	162.5	158.8	穿 Through
	B10	49.9	0.0	12.64	169.3	0.0	158.8	225.0	未穿 Non-through
卵形弹 Ogival	O1	50.1	3.3	12.64	293.7	87.0	239.7	359.1	穿 Through
	O2	50.1	5.4	12.62	284.3	93.0	178.0	396.0	穿 Through
	O3	50.0	3.9	12.65	283.7	79.0	196.0	427.5	穿 Through
	O4	49.9	9.1	12.62	268.7	0.0	182.2	663.8	嵌入 Embedded
	O5	50.1	1.1	12.64	259.9	0.0	224.0	360.0	嵌入 Embedded
	O6	50.1	—	12.62	257.3	0.0	216.0	246.3	冲塞(未穿) Plug(Non-through)
	O7	50.1	3.3	12.64	242.2	0.0	175.0	306.0	反弹 Rebounded

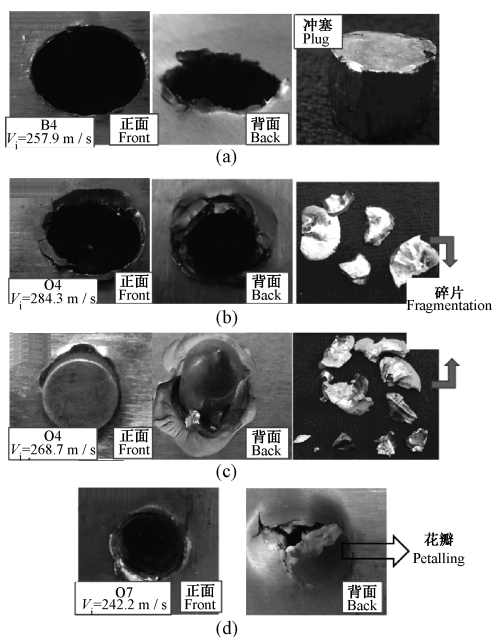


图 5 平头弹和卵形弹侵彻后靶板损伤形貌

Fig.5 Damage morphology of TC4 targets after impact by blunt and ogival projectiles

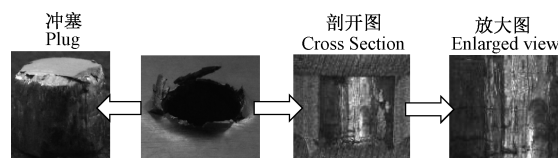


图 6 平头弹穿透后靶板弹孔截面及冲塞

Fig.6 The projectile-hole section and plug of a typical target impacted by blunt projectile

图 7 为卵形弹侵彻靶板后,断口局部区域(如图 7a 中标记位置)的 SEM 图,在图 7b 中存在一些平滑小平面,但是大部分区域都布满了韧窝,而韧窝断裂属于一种高吸能过程的延性断裂。断口上大量韧窝特征的存在说明靶板在卵形弹侵彻过程中主要发生了拉伸撕裂破坏。

图 8 给出了平头弹侵彻靶板后的冲塞及冲塞表面的 SEM 形貌图,可以观察到大量的平滑区和少量的韧窝区,大量的平滑区说明剪切破坏是主要的失效原因。少量韧窝的出现从微观角度说明了在平头弹侵彻中,靶板除剪切破坏外,也有一些拉伸撕裂的情况存在。

图 9 给出的是平头弹侵入靶板但未贯穿 ($V_i = 169.3 \text{ m/s}$) 的实验中绝热剪切带 (ASB) 的光学显微图和微观图片。图 9 的光学显微图中, 在平头弹和靶板接触圆周的边缘点, 沿着弹体侵彻的方向可以观察到断断续续的宏观裂纹。在扫描电子显微镜 (SEM) 下观察该裂纹, 发现在沿着宏观裂纹产生的方向, 存在宽度为几个到十几微米的狭长的绝热剪切带。这是由于在弹体的侵彻阶段, 塑性变形主要集中在弹头前方狭窄的环形区域内, 塑性功转化的热量在很短的时间内无法传出, 产生绝热升温, 引起热软化效应, 当热软化效应超过应变率强化效应和应变硬化效应时, 材料就会发生“热塑性失稳”, 使剪切变形集中在很有限的区域内, 最终形成绝热剪切带。由于绝热剪切带内应力集中、局布化的升温 and 变形, 成为微裂纹和微孔洞的起源, 而微裂纹和微孔洞沿着绝热剪切带迅速扩展连接形成宏观裂纹。绝热剪切带的形成标志着靶板吸收的能量大大降低, 同时靶板的防护能力大幅下降。

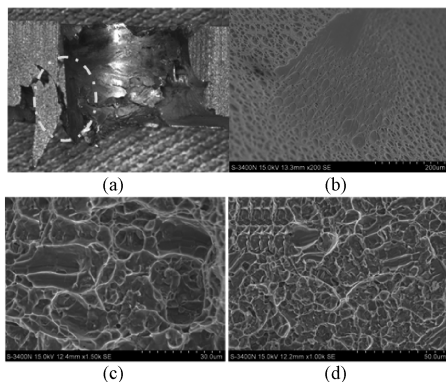


图 7 卵形弹侵彻靶板后断口的 SEM 形貌图

Fig.7 SEM fractographs of plate impacted by ogival projectile

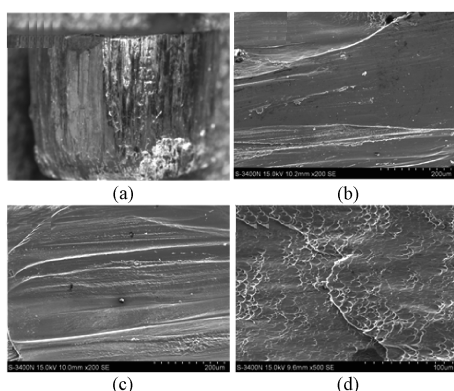


图 8 冲塞及断口表面的 SEM 形貌图

Fig.8 Plug and the SEM fractographs of plug surface

综合以上结果和分析, 可以看出, 平头弹和卵形弹侵彻靶板造成的破坏机理是不同的。平头弹侵彻靶板时产生了绝热剪切带, 发生的破坏绝大部分为剪切冲塞破坏, 而卵形弹侵彻靶板时则为花瓣型破坏, 以挤压

和拉伸破坏为主, 而拉伸破坏所吸收的能量较之剪切破坏更多。这是卵形弹的弹道极限高于平头弹的主要原因。

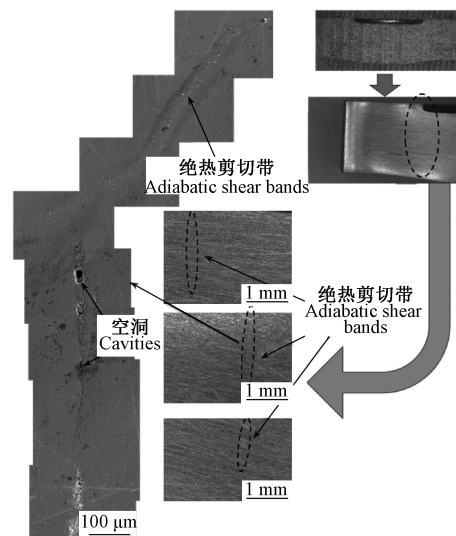


图 9 绝热剪切带的光学显微图和微观照片 ($V_i = 169.3 \text{ m/s}$)

Fig.9 Optical and SEM micrographs of adiabatic shear bands ($V_i = 169.3 \text{ m/s}$)

4 结论

通过轻气炮发射 12.7 mm 直径平头和卵形头两种杆弹正撞击 10 mm 厚 TC4 钛合金板的实验, 研究了 160 m/s ~ 320 m/s 速度范围内, TC4 钛合金平板的损伤行为及弹头形状对其抗侵彻性能的影响, 可以得到如下结论:

1) 在本研究的速度范围内, TC4 钛合金板抗卵形弹侵彻的能力强于抗平头弹。

2) 平头弹和卵形弹侵彻时靶板的失效机理不同。平头弹侵彻后靶板的宏观损伤形貌和微观观察都证实了侵彻中靶板发生了绝热剪切冲塞现象。卵形弹侵彻后靶板主要发生塑性开孔及花瓣型开裂失效。剪切冲塞破坏, 尤其是绝热剪切消耗能量更少, 从而导致 TC4 钛合金板对平头弹抗侵彻性能更差。

参考文献 (References)

- [1] 余东辉, 范群波, 王富耻, 等. 铸造态钛合金力学性能及抗弹性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017(8):198-203.
YU DongHui, FAN QunBo, WANG FuChi, et al. Mechanical properties and ballistic performance of as-cast titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017(8):198-203 (In Chinese).
- [2] 胡嘉蓉, 陶春虎, 郭冠华, 等. 钛合金穿甲侵彻损伤行为研究现状[J]. 失效分析与预防, 2017, 12(6):392-397.
HU JiaRong, TAO ChunHu, GUO GuanHua, et al. Research progress of armor-piercing damage of titanium alloys[J]. Failure Analysis and Prevention, 2017, 12(6):392-397 (In Chinese).

- [3] 张 新. 钛合金靶板抗弹性能的数值模拟研究[D].太原:中北大学, 2015;1-8.
ZHANG Xin. Numerical simulation on the titanium alloy plates against fragments[D]. Taiyuan:North University of China, 2015;1-8(In Chinese).
- [4] 惠旭龙, 刘小川, 王计真, 等. TC4 钛合金平板高速撞击损伤及弹道极限特性[J]. 科学技术与工程, 2017(11):6-13.
HUI XuLong, LIU XiaoChuan, WANG JiZhen, et al. High velocity impact failure and ballistic performance of TC4 plate[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(11):6-13(In Chinese).
- [5] 周 伟, 葛 鹏, 辛海鹰, 等. 一种高强钛合金靶材的穿甲损伤行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(4):781-784.
ZHOU Wei, GE Peng, XIN HaiYing, et al. Penetration damaging behavior of a sort of high strength titanium alloy target[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(4):781-784(In Chinese).
- [6] Singh B B, Sukumar G, Bhattacharjee A, et al. Effect of heat treatment on ballistic impact behavior of Ti-6Al-4V against 7.62 mm deformable projectile[J]. Materials & Design, 2012(36):640-649.
- [7] Zheng C, Wang F, Cheng X, et al. Effect of microstructures on ballistic impact property of Ti-6Al-4V targets[J]. Materials Science and Engineering; A, 2014(608):53-62.
- [8] Zhang T, Chen W, Guan Y, et al. Study on titanium alloy TC4 ballistic penetration resistance part i: Ballistic impact tests[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(3):388-395.
- [9] Zhang T, Chen W, Guan Y, et al. Study on ballistic penetration resistance of titanium alloy TC4, Part II: Numerical analysis[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(3):606-613.
- [10] 张铁纯, 张 永, 田 锐, 等. TC4 钛合金板厚度对其撞击失效特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10):52-57.
ZHANG TieChun, ZHANG Yong, TIAN Rui, et al. Influence of the thickness on the impact failure characteristics of TC4 titanium alloy plate[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(10):52-57(In Chinese).
- [11] 郑 超, 朱秀荣, 辛海鹰, 等. 厚度和层间界面对 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(1):242-248.
ZHENG Chao, ZHU XiuRong, XIN HaiYing, et al. Effects of target thickness and macroscopic interface on the ballistic performance of Ti6Al4V titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(1):242-248(In Chinese).
- [12] Recht R F, Ipson T W. Ballistic perforation dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(3):384-390.