

厚度和层间界面对 Ti6Al4V 钛合金 抗弹性能的影响

郑超^{1,2}, 朱秀荣¹, 辛海鹰¹, 邵志文¹, 王欢², 彭华新², 程兴旺³, 王富耻³

(1. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

(2. 浙江大学 功能复合材料与结构研究所, 浙江 杭州 310000)

(3. 北京理工大学 冲击环境材料技术重点实验室, 北京 100081)

摘要:开展了 Ti6Al4V 钛合金的抗弹性能研究,通过对厚度为 10~30 mm 的均质 Ti6Al4V 钛合金靶板和总厚度为 30 mm 的 (15+15) mm 双层 Ti6Al4V 钛合金靶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:Ti6Al4V 钛合金的抗弹性能随着厚度的增加逐渐提高;在靶板厚度由 15 mm 增加到 20 mm 时,其抗弹性能出现了陡增,这与其损伤模式由脆性冲塞破坏转变为塑性扩孔破坏有关;层间界面不利于 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的提高,厚度为 30 mm 的单层均质 Ti6Al4V 钛合金靶板的抗弹性能优于总厚度为 30 mm 的 (15+15) mm 双层 Ti6Al4V 钛合金靶板,这与双层靶板的层间界面几乎无剪切强度有关。

关键词: Ti6Al4V 钛合金; 抗弹性能; 厚度效应; 界面效应

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)01-0242-07

钛合金材料具有比强度高、耐蚀能力强、动态承载能力和抗弹性能优异等特点,随着近些年钛合金材料生产制造成本的不断降低,使得其在兵器领域坦克装甲车辆上应用成为可能^[1,2]。

Ti6Al4V 是钛合金材料中研究最多、应用最广泛的一种两相钛合金。早在 20 世纪 50 年代,就有研究表明:钛合金的抗弹性能优于均质装甲钢。近二三十年,钛合金的抗弹性能及其抗弹机理研究再次受到了人们的关注。

在装甲钛合金的抗弹性能相关的研究工作方面,20 世纪 90 年代,美国陆军研究实验室^[3-8]开展了大量的不同口径破片模拟弹(FSP)、普通穿甲弹(AP)、脱壳稳翼穿甲弹(APDS)对不同厚度钛合金,尤其是 Ti6Al4V 钛合金的终点弹道侵彻实验,得到了其极限击穿速度 V50,并建立了美军装甲钛合金的通用标准 MIL-A-46077(A-G)等;该研究室还开展了不同长径比的钨合金/贫铀合金制长杆形穿甲弹侵彻 Ti6Al4V 钛合金的实验,这些实验的研究结果表明:在分别采用长径比为 10 的钨合金制长杆形穿甲弹和贫铀合金制长杆形穿甲弹的情况下,Ti6Al4V 钛合金靶板的抗弹性能比均质装甲钢提高了 60%~80%。Lee 等^[9]通过使用 12.7 mm AP 侵彻等轴组织和双态组织的 Ti6Al4V

钛合金靶板,以均质装甲钢(RHA)的质量防护系数为基准评估了 Ti6Al4V 钛合金的抗弹性能,结果表明:等轴组织和双态组织的 Ti6Al4V 钛合金靶板的质量防护系数,分别约为 1.23 和 1.44。Lee 等^[10-12]还通过热处理制度的设计和优化,系统的研究了等轴组织、片层组织和双态组织等微观组织对 Ti6Al4V 钛合金的动态力学性能和抗弹性能的影响规律。

在装甲钛合金的抗弹机理相关的研究方面,Me-Bar 等^[13]开展了厚度为 7~13.6 mm 的 Ti6Al4V 钛合金靶板的抗弹性能及其抗弹机理研究,认为钛合金靶板的破坏模式,随着靶板厚度的增加,从耗能能力较低的脆性冲塞破坏转变为了具有较高耗能能力的塑性扩孔破坏。Grebe 等^[14]使用阶梯状子弹侵彻厚度为 12.5 mm 的纯钛靶板和 Ti6Al4V 钛合金靶板,结果表明:对于纯钛和 Ti6Al4V 钛合金靶板,其塞柱的形成是和绝热剪切带的萌生扩展和带内微裂纹的成核长大及其最终贯通连接有关的。Murr 等^[15,16]认为 Ti6Al4V 钛合金靶板以冲塞为特征的脆性损伤模式是由这样一种塑性流变机制作用所导致:随着弹丸侵彻速度的提高,Ti6Al4V 钛合金靶板内绝热剪切带及其诱发的微裂纹的数量逐渐增加,这些萌生扩展的绝热剪切带及其微裂纹最终形成了近似圆柱形的导致靶板失载的塑

收稿日期: 2018-01-08

作者简介: 郑超,男,1986 年生,博士,助理研究员,中国兵器科学研究院宁波分院,浙江 宁波 315103, E-mail: zhchliuyang@126.com

性流变机制。作者^[17]开展的等轴组织和片层组织Ti6Al4V钛合金靶板失效机制的研究表明,不同微观组织的钛合金其失效机制不同,这种失效机制上的差异是由于不同微观组织的Ti6Al4V钛合金中绝热剪切局域化行为的不同所导致。

Ti6Al4V钛合金在装甲防护技术领域中,既可单独以均质靶板的形式使用,也可以与装甲钢、装甲铝合金和装甲陶瓷等装甲材料相复合以构成复合防护结构使用。为了使得装甲钛合金的使役性能优势能够在工程应用中得到充分的发挥,本实验通过对厚度为10~30 mm的均质Ti6Al4V钛合金靶板和总厚度为30 mm的(15+15) mm双层Ti6Al4V钛合金靶板的终点弹道侵彻实验,结合弹靶实验后Ti6Al4V钛合金靶板的宏微观损伤行为特征分析,研究了厚度和层间界面对Ti6Al4V钛合金抗弹性能的影响规律。

1 实验

Ti6Al4V钛合金板材由宝钛集团提供,名义成分:6.42Al-4.17V-0.19Fe-0.20O-0.01C-0.02N-0.003H-Ti(质量分数,%),β转变点为(993±5)℃。

通过机械加工,在Ti6Al4V钛合金板材的轧制方向切取金相试样、室温静态拉伸试样和动态压缩试样。金相试样经研磨抛光后,使用腐蚀液(HF 1 mL, HNO₃ 2 mL和H₂O 5 mL)腐蚀,并使用光学显微镜ZEISS Observer A1m对Ti6Al4V钛合金进行金相分析。室温静态拉伸性能测试实验在Instron万能试验机上开展,加载应变率为10⁻³ s⁻¹。动态硬度和动态压缩性能测试实验在分离式Hopkinson压杆及其改进装置上开展,加载应变率为10³ s⁻¹。

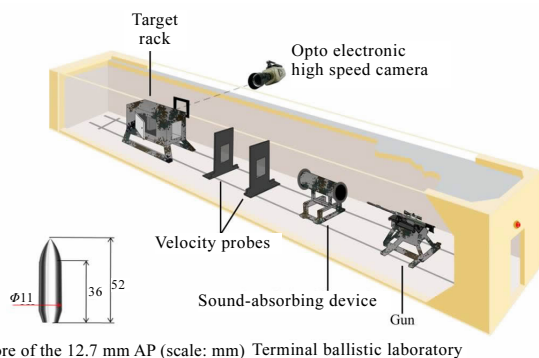


图1 终点弹道实验室及其实验装置和实验中12.7 mm穿甲弹丸弹芯示意图

Fig.1 Terminal ballistic laboratory and the core of the 12.7 mm AP

实验中使用12.7 mm普通穿甲燃烧弹垂直侵彻靶板,该弹丸弹芯由T12A合金钢制成,重约30 g;该弹丸弹速,经测速幕靶测得为(830±15) m/s。将厚度为δ的待测Ti6Al4V钛合金靶板固定于距离枪口约10 m的位置,以45 mm的603装甲钢作为背板,背板与待测Ti6Al4V钛合金靶板之间的距离约为30 mm,以使得待测靶板的抗弹性能不受均质装甲钢的影响,并保证穿过待测靶板的弹体侵入均质装甲钢的过程不受待测靶板影响。终点弹道实验室及其实验装置和12.7 mm普通穿甲弹的弹芯示意图,如图1所示。

通过机械加工,在Ti6Al4V钛合金板材上切取尺寸为δ(厚度:10, 15, 20, 25和30 mm)×150 mm×150 mm的靶板,使得弹靶实验中T(靶板厚度)/D(弹芯直径)依次为:0.91, 1.36, 1.82, 2.27和2.73。实验中使用的Ti6Al4V钛合金靶板结构示意图如图2所示。待测Ti6Al4V钛合金靶板中,均质靶板根据厚度的差别,依次编号:AR10、AR15、AR20、AR25、AR30;双层靶板及面背板组元,依次编号:ARAR、AR1、AR2,其中AR1表示双层靶板ARAR中第1层靶板,AR2表示双层靶板ARAR中第2层靶板。为了准确的获得Ti6Al4V钛合金靶板的抗弹性能,每组靶板都进行3次有效的弹靶实验并取得其在603装甲钢上残余穿深的算术平均值,保证不同弹靶实验弹坑间距大于3倍弹芯直径。弹靶实验后的Ti6Al4V钛合金靶板沿弹坑中线剖开,一半用于弹坑宏观损伤特征的分析,另一半用于弹坑微观损伤特征的分析。

2 结果与讨论

2.1 微观组织和静动态力学性能

Ti6Al4V钛合金板材的微观组织如图3所示。可以看到,无论是从板材的轧制方向观察,还是从板材

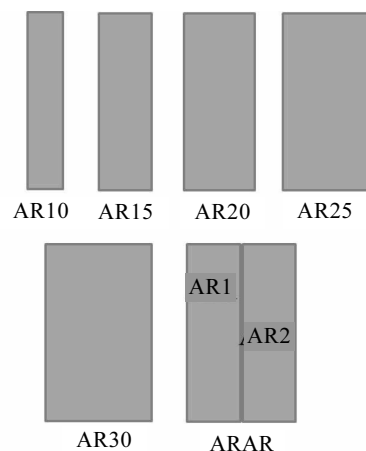


图2 待测Ti6Al4V钛合金靶板示意图

Fig.2 Configurations of the Ti6Al4V targets assembled

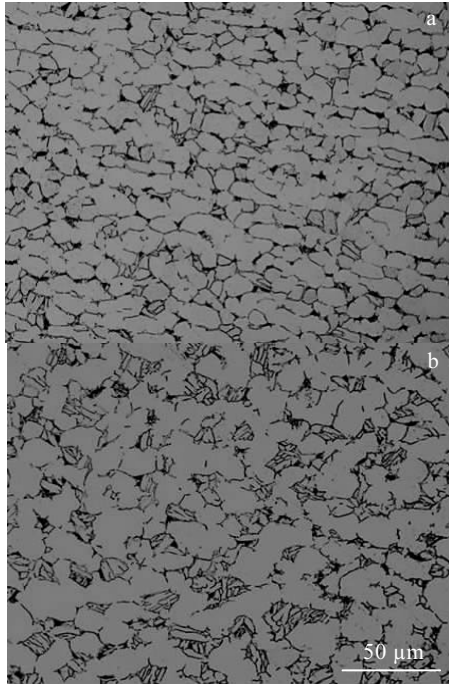


图 3 Ti6Al4V 钛合金的微观组织

Fig.3 Optical microstructure of the Ti6Al4V alloy: (a) rolling direction and (b) vertical direction

的厚度方向观察，供货态 Ti6Al4V 钛合金板材均呈现出了典型的等轴组织特征，等轴 α 相的尺寸为 15~20 μm 。Ti6Al4V 钛合金板材的静动态力学性能见表 1。

2.2 Ti6Al4V 钛合金的抗弹性能

终点弹道侵彻实验后，Ti6Al4V 钛合金均质靶板 AR10、AR15、AR20、AR25、AR30 和双层靶板 ARAR，在 603 装甲钢上的残余穿深分别为 27.33，23.00，15.67，11.82，8.75 和 10.83 mm，如图 4 所示。

可以看到，均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR10~AR30 的残余穿深随着靶板厚度的增加而逐渐减小，这表明，在 12.7 mm 普通穿甲弹丸的侵彻条件下，均质 Ti6Al4V 钛合金靶板的抗弹性能呈现出了正效应，即靶板厚度增加，其抗弹性能提高；双层 Ti6Al4V 钛合金靶板 ARAR 相比同等厚度均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30，其残余穿深要更大，这表明，层间界面的引入不利于 Ti6Al4V 钛合金靶板抗弹性能的提高。

值得注意的是，均质 Ti6Al4V 钛合金靶板在厚度由 15 mm 增大到 20 mm 时，其残余穿深减小趋势增大，也即抗弹性能出现了陡增（约 47%）。

表 1 Ti6Al4V 钛合金的室温静动态力学性能

Table 1 Quasi-static and dynamic mechanical properties of Ti6Al4V alloy

Materials	Hardness, HRC	Ultimate tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Area reduction/%
Ti6Al4V	32.0	971	892	16	36
Materials	Dynamic hardness/GPa	Dynamic compressive strength/MPa	Failure strain/%	Energy absorbed/MJ·m ⁻³	-
Ti6Al4V	4.95	1504	20	304	-

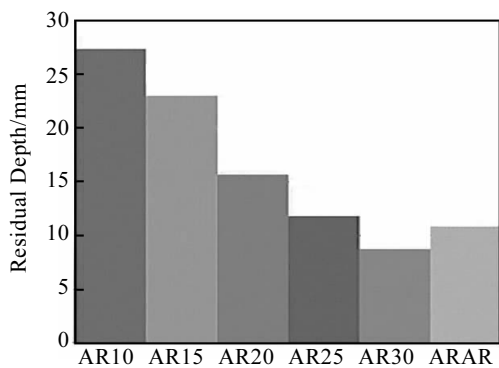


图 4 Ti6Al4V 钛合金靶板的残余穿深

Fig.4 Residual depth of penetration for the Ti6Al4V targets

2.3 厚度对均质 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的影响规律

为了进一步认识厚度对均质 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的影响规律，开展了击穿后靶板的宏微观损伤特征分析。

弹靶实验后，均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR10~AR30 的面、背部损伤特征如图 5 所示。其中，上排为面部损伤特征，下排为背部损伤特征。均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR10~AR30 的剖面照片如图 6 所示。

结合 Ti6Al4V 钛合金靶板的面、背部损伤特征和剖面照片，可以看到，当 T/D 小于 1 时，Ti6Al4V 钛合金靶板 AR10 面、背部均没有形成明显的崩落物，弹坑呈现较规则圆柱形冲塞特征，这表明，Ti6Al4V 钛合金靶板 AR10 的损伤模式为脆性冲塞破坏；当 T/D 为 1.82 时，Ti6Al4V 钛合金靶板 AR20 面、背部出现

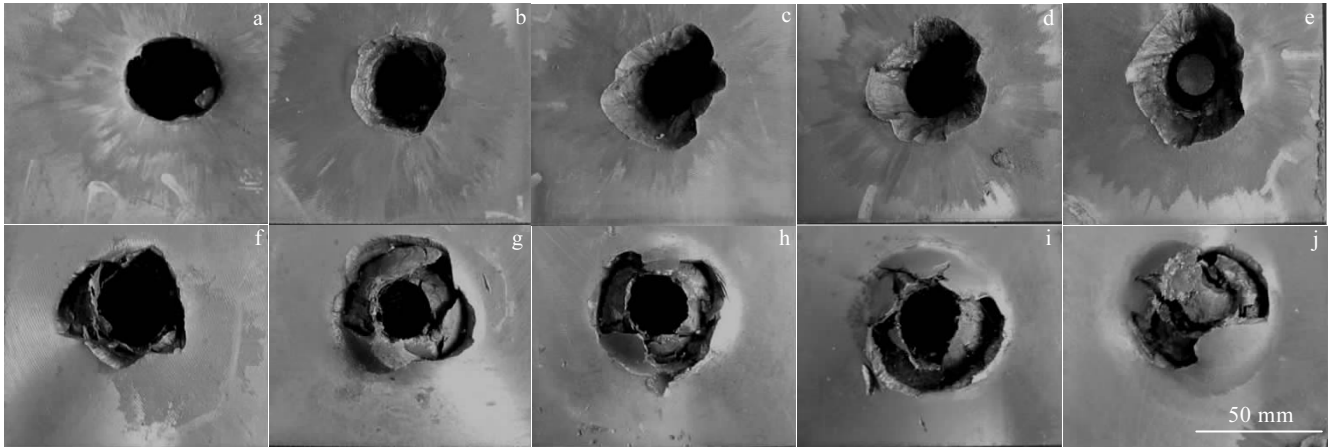


图 5 均质 Ti6Al4V 钛合金靶板的面、背部损伤特征

Fig.5 Macro-damage features of the face (a~e) and back surfaces (f~j) for the Ti6Al4V targets: (a, f) AR10, (b, g) AR15, (c, h) AR20, (d, i) AR25, and (e, j) AR30

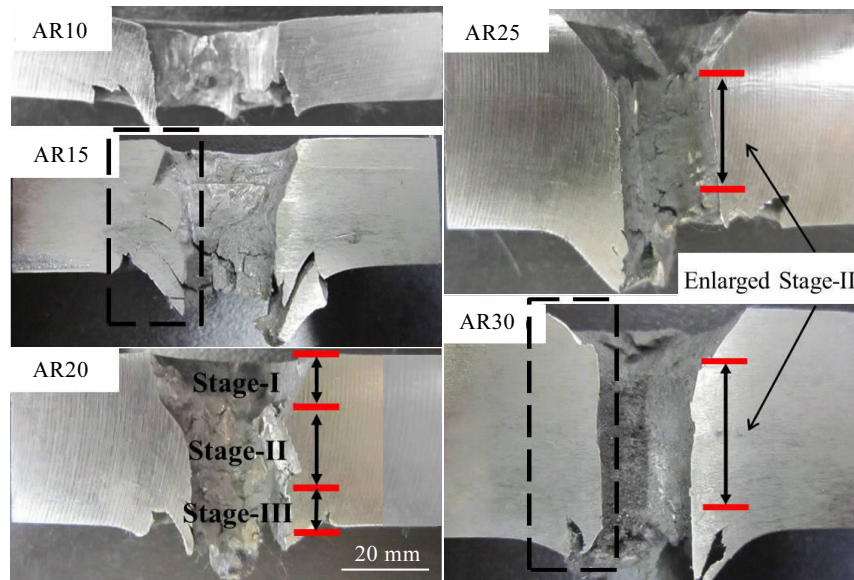


图 6 均质 Ti6Al4V 钛合金靶板的剖面照片

Fig.6 Perforated channels of the monolithic Ti6Al4V targets

了较严重的崩落破坏特征，穿甲弹丸侵入靶板的过程也可以明显的区分为：（1）Stage-I 开坑阶段；（2）Stage-II 定常侵彻阶段；（3）Stage-III 击穿阶段等 3 个弹靶作用阶段，这表明，Ti6Al4V 钛合金靶板 AR20 的损伤模式为塑性扩孔破坏^[18]；当 T/D 为 2.73 时，Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 面、背部损伤特征和靶板 AR20 近似，通过剖面照片观察发现，Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 也呈现出了塑性扩孔破坏模式，相比于靶板 AR20，其与穿甲弹丸在定常侵彻阶段的作用过程更长。

通过对比均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR10~AR30

的宏观损伤特征，不难发现，在 12.7 mm 普通穿甲弹的侵彻条件下，当靶板厚度由 10 mm 增大到 20 mm 时，随着厚度的增加 Ti6Al4V 钛合金的宏观损伤模式由脆性冲塞破坏转变为塑性扩孔破坏；当靶板厚度由 20 mm 增大到 30 mm 时，Ti6Al4V 钛合金的宏观损伤模式始终为塑性扩孔破坏，随着靶板厚度的增加 Ti6Al4V 钛合金的定常侵彻阶段增长。

通常，脆性冲塞破坏被认为是弹靶作用过程中耗能能力较低的一种靶板损伤模式，而塑性扩孔破坏则被认为是弹靶作用过程中耗能能力较高的一种靶板损

伤模式^[13,18]。因此，作者认为，均质 Ti6Al4V 钛合金靶板厚度由 15 mm 增大为 20 mm 时出现的抗弹性能的陡增正是由于这种损伤模式的变化所导致的。

Ti6Al4V 钛合金靶板 AR15 和 AR30 的微观损伤特征如图 7 所示。可以看到，一方面，2 种厚度的 Ti6Al4V 钛合金靶板在穿甲弹丸的侵彻条件下，都经历了开坑、击穿等作用阶段，形成了大量微裂纹并最终导致了靶板的击穿；另一方面，相比于靶板 AR30，靶板 AR15 没有形成明显的定常侵彻区。

钛合金材料在动态承载条件下，在应变硬化、应变率硬化和热软化的综合作用下，易于发生绝热剪切局域化作用形成绝热剪切带，并进而在载荷的作用下，由绝热剪切带带内诱发形成微裂纹成为其失载破坏的通道。对靶板 AR30 定常侵彻阶段的观察可以发现，由于穿甲弹丸侵入靶板的挤凿作用，靶板弹坑附近变形严重，通过对弹坑附近选区 A 和 B 的微观分析，发现了弹坑附近绝热剪切带的分叉及其诱发的微裂纹，如图 8 所示。

2.4 层间界面对 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的影响规律

图 9 和图 10 所示为均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 和双层 (15+15) mm 复合靶板 ARAR 的面、背部宏观损伤特征和剖面照片。

可以看到，双层 (15+15) mm 复合靶板 ARAR 的面板 AR1 和背板 AR2 均呈现出了同均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 相近的损伤特征，即在开坑阶段发生面部崩落破坏，在击穿阶段发生翻花和背部崩落破坏。

图 11 为均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 和双层 (15+15) mm 复合靶板 ARAR 的微观损伤特征，取样位置为图 10 中虚线框所示。

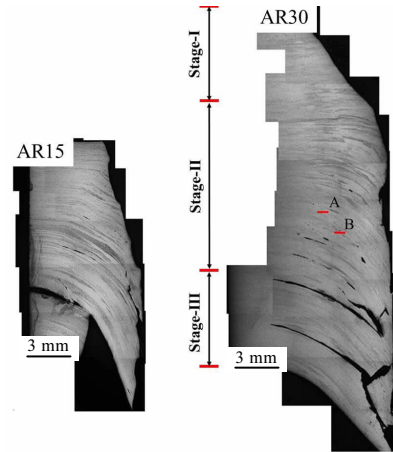


图 7 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR15 和 AR30 的微观损伤特征
Fig.7 Micro-damage features of the Ti6Al4V targets AR15 and AR30

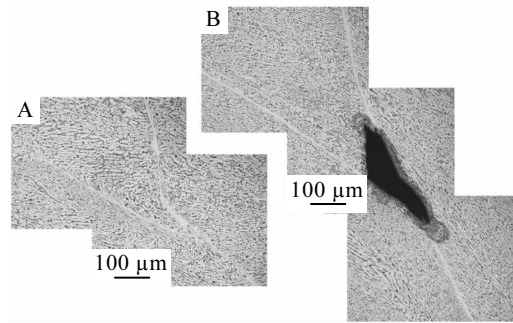


图 8 均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 中的绝热剪切带分叉及其诱发的微裂纹
Fig.8 Bifurcation of adiabatic shear bands and adiabatic shear bands induced micro-cracks in the monolithic Ti6Al4V target AR30

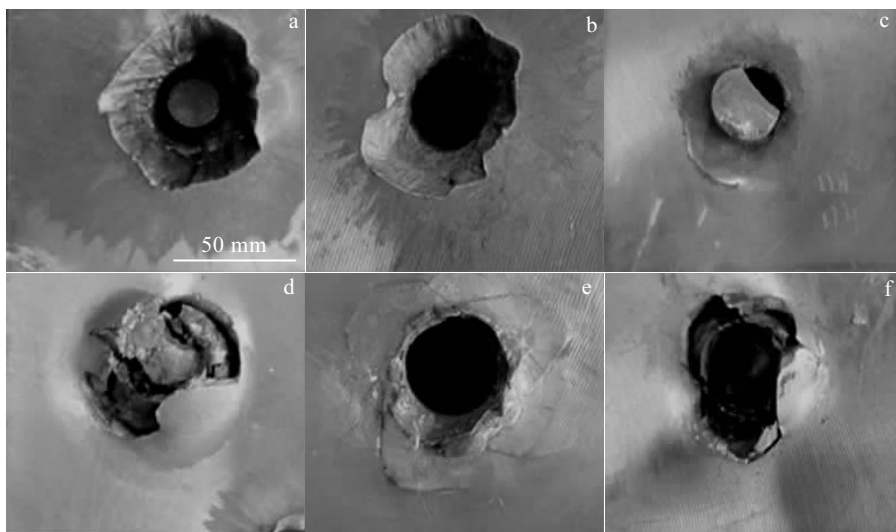


图 9 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 和 ARAR 的面、背部损伤特征
Fig.9 Face (a~c) and back surfaces (d~f) of the Ti6Al4V targets: (a, d) AR30, (b, e) ARAR:AR1, and (c, f) ARAR:AR2

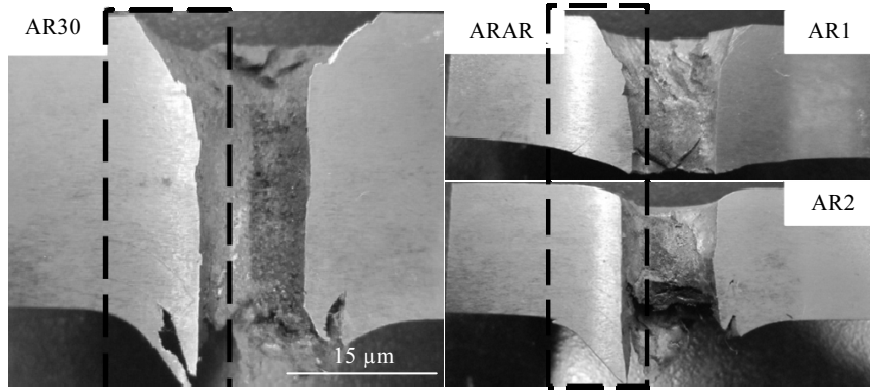


图 10 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 和 ARAR 的剖面照片

Fig.10 Macro-damage features of the Ti6Al4V targets AR30 and ARAR

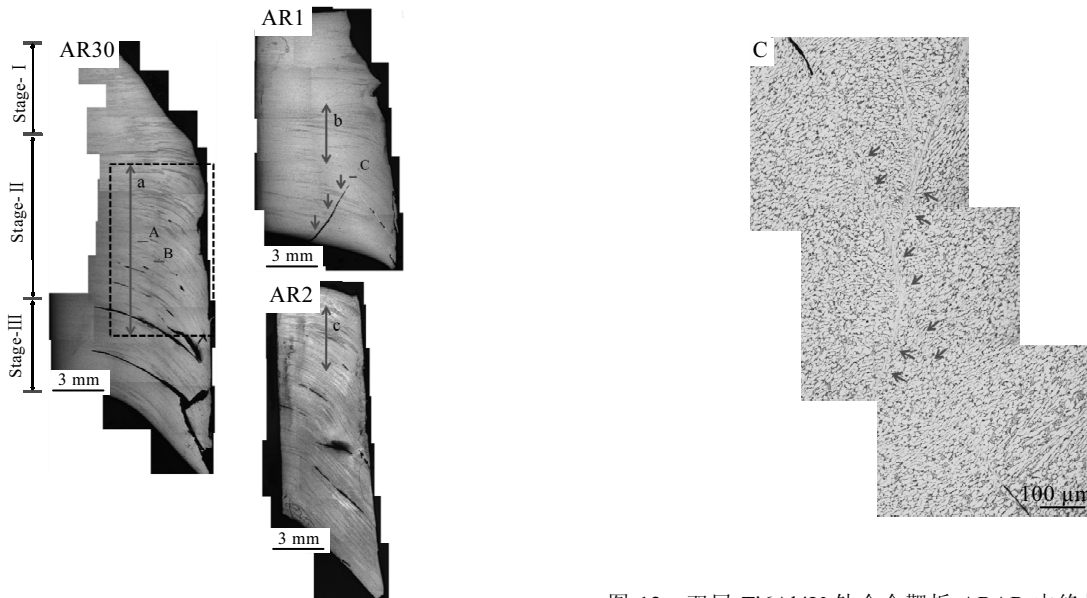


图 11 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 和 ARAR 的微观损伤特征

Fig.11 Micro-damage features of the Ti6Al4V targets AR30 and ARAR

图 12 双层 Ti6Al4V 钛合金靶板 ARAR 中绝热剪切带的交互作用

Fig.12 Intersection of adiabatic shear bands in the double-layered Ti6Al4V targets ARAR

由图 11 可以看到,均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 和双层 Ti6Al4V 钛合金靶板 ARAR 在微观损伤特征上的主要差别是,靶板 AR30 由于是均质连续的,其剪切变形区较大,如图 10 中虚线框所示,在此区域内观察到的绝热剪切带发生了交互和弯折等现象,这种剪切变形局域化行为被认为是强烈影响 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的重要因素^[17,19,20]。双层靶板 ARAR,由于其在层间界面的剪切强度几乎为 0,在组元 AR1 的背面形成了明显的宏观裂纹(见图 11 中箭头所示)。通过进一步对弹坑附近 C 处的观察,发现双层 Ti6Al4V 钛合金靶板中面部组元 AR1 中还存在绝热剪切带的交互行为,如图 12 所示。

层间界面的存在使得双层靶板 ARAR 中不能形成连续的剪切变形区;测量可知,其剪切变形区的总长度 (b+c) 为 14~16 mm,而均质 Ti6Al4V 钛合金靶板 AR30 的剪切变形区的长度 a 为 18~20 mm。由于单层靶板 AR30 形成了较大的剪切变形区利于其消耗穿甲弹弹体能量,因此,单层靶板 AR30 比双层 (15+15) mm 复合靶板 ARAR 抗弹性能优异。

3 结 论

1) 厚度对 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的影响规律为正效应,即随着靶板厚度的增加,抗弹性能逐渐提高。

2) 在 Ti6Al4V 钛合金靶板厚度由 15 mm 增加到 20 mm 时, 其抗弹性能出现了陡增, 这与其损伤模式由脆性冲塞破坏转变为塑性扩孔破坏有关。

3) 层间界面不利于 Ti6Al4V 钛合金抗弹性能的提高, 厚度为 30 mm 的单层均质 Ti6Al4V 钛合金靶板的抗弹性能优于总厚度为 30 mm 的 (15+15) mm 双层 Ti6Al4V 钛合金靶板的抗弹性能, 这与双层靶板的层间界面几乎无剪切强度有关。

参考文献 References

- [1] Montgomery J, Wells M. *JOM*[J], 1997(5): 46
- [2] Montgomery J, Wells M. *JOM*[J], 2001(4): 29
- [3] Burkins M, Gooch W. *Cost Effective Application of Titanium Alloys in Military Platforms*[C]. Loen, Norway: RTO-MP-069(II), 2001
- [4] Gooch W, Burkins M. *Cost Effective Application of Titanium Alloys in Military Platforms*[C]. Loen, Norway: RTO-MP-069(II), 2001
- [5] Rupert N L, Grace F I, Huang W *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 1997, 20: 685
- [6] Gu Y B, Nesterenko V F. *Journal of Composite Materials*[J], 2007, 41: 2313
- [7] Bless S, Gooch W, Satapathy S *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 1997, 20: 121
- [8] Gooch W, Burkins M, Walters W P *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2001, 26: 243
- [9] Lee D G, Lee Y H, Lee S Hak *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2004, 35: 3103
- [10] Lee D G, Lee S Hak, Lee C S *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2003, 34: 2541
- [11] Lee D G, Lee Y H, Lee C S *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2005, 36: 741
- [12] Lee D, Lee S Hak, Lee C S *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2005, 40: 4077
- [13] Me-Bar Y, Rosenberg Z. *International Journal of Impact Engineering*[J], 1997, 19: 311
- [14] Grebe H, Pak H, Meyers M. *Metallurgical Transaction A*[J], 1985, 16: 761
- [15] Martinez F, Murr L E, Ramirez A *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 454-455: 581
- [16] Murr L, Ramirez A, Gaytan S M *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 516: 205
- [17] Zheng C, Cheng X, Wang F *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2015, 85: 161
- [18] Bartus S. *Evaluation of Titanium-5Al-5Mo-5V-3Cr(Ti-5553) Alloy Against Fragment and Armor-Piercing Projectiles*, ARL-TR-4996[R]. U S Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, 2009
- [19] Sun K, Yu X, Tan C *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 595: 247
- [20] Sun K, Yu X, Tan C *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 606: 257

Effects of Target Thickness and Macroscopic Interface on the Ballistic Performance of Ti6Al4V Titanium Alloy

Zheng Chao^{1,2}, Zhu Xiurong¹, Xin Haiying¹, Shao Zhiwen¹, Wang Huan², Peng Huaxin², Cheng Xingwang³, Wang Fuchi³

(1. Ningbo Branch of China Ordnance Academy, Ningbo 315103, China)

(2. Institute for Composites Science Innovation, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

(3. National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Effects of target thickness and macroscopic interface on the ballistic performance of Ti6Al4V titanium alloy were investigated. The monolithic Ti6Al4V titanium alloy with thickness varied from 10 mm to 30 mm and the armor configurations of the double-layered (15+15) mm Ti6Al4V titanium alloy were normally impacted by the 12.7 mm AP. The results show that the ballistic performance increases with the increase of the target thickness. Significant improvement is observed when the target thickness varies between 15 mm and 20 mm, which is considered to be related to the failure mechanism involved. The 30 mm monolithic Ti6Al4V titanium alloy is more effective than the (15+15) mm double-layered Ti6Al4V titanium alloy, which is related to the fact that no shear strength exists on the macroscopic interface between the double-layered targets.

Key words: Ti6Al4V; ballistic performance; target thickness; interface

Corresponding author: Zheng Chao, Ph. D., Research Assistant, Ningbo Branch of China Ordnance Academy, Ningbo 315103, P. R. China, E-mail: zhchliuyang@126.com