

钛合金装甲材料动态压缩力学性能及其抗弹能力关系

高瑞华¹, 范群波¹, 王富耻¹, 张毅鹏¹, 霍利瑞¹, 裴传虎²

(1. 北京理工大学, 北京 100081)

(2. 中航工业北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 采用分离式 Hopkinson Bar 技术针对不同热处理制度的 TC6、ATI425 以及 TC3 钛合金 $\Phi 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 圆柱形试样进行了动态压缩实验, 测定得到了试样在 3000 s^{-1} 高应变率条件下的动态强度、动态塑性及冲击吸收功; 同时开展了以钛合金为面板、A3 钢为背板的复合装甲抗弹性能试验, 分析了钛合金动态力学性能与其抗弹性能之间的关系。结果表明: 钛合金面板的抗弹性能与其动态强度和动态塑性均密切相关; 钛合金的动态强度对材料抗弹性能的影响比动态塑性更加显著, 其抗弹性能主要取决于动态强度; 同时, 表征钛合金动态力学性能优劣的冲击吸收功不能直接反映钛合金的抗弹能力; 较大区域的正面开坑和较小的剪切充塞可以明显提高钛合金面板的抗弹性能。

关键词: 钛合金; 抗弹性能; 动态强度; 动态塑性; 冲击吸收功

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)11-2733-04

钛合金由于其具有强度高、较好的塑韧性、低密度及抗冲击等良好的综合性能, 成为新一代防护装甲的优选材料^[1]。与传统装甲钢相比, 可以使质量减小 25%~60%^[2], 同时大幅提高装甲的抗弹性能。目前, 围绕钛合金抗弹性能表征学者已开展了一系列工作。美国陆军研究实验室以 Ti-5553 为研究对象, 研究了固溶时效 (solution treated and aged, 简称 STA) 和 β 退火、缓冷及时效 (β annealed, slow cooled and aged, 简称 BASCA) 2 种热处理条件下钛合金的抗弹性能, 以弹道极限速度 V50 作为其抗弹性能的评估参量。研究表明, 具有更高综合力学性能的 BASCA 板弹道极限速度 V50 比 STA 板低。Sukumar^[3] 等人研究发现, β -CEZ 钛合金经过一定的热处理制度后, 其在准静态条件下的抗拉强度高达 1320 MPa、延伸率 11.0%, TC4 钛合金相应的抗拉强度仅为 1149 MPa、延伸率 10.5%, 然而后者在靶试试验中表现出来的抗弹性能优于 β -CEZ。可见, 尽管材料在准静态条件下表现出更高综合力学性能及更强塑性的材料, 但实际的抗弹性能却不一定好, 准静态下的力学参量并不能很好的表征其抗弹性能。究其原因, 是因为弹体高速侵彻条件下材料的应变率达 3000 s^{-1} , 服役条件明显不同于准静态, 可见动态力学性能表征更为必要。

本研究利用分离式 Hopkinson Bar 技术, 针对不同热处理制度的 TC6、ATI425 以及 TC3 钛合金, 采用 $\Phi 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的圆柱形试样进行了动态压缩实验, 同时开展了相应的 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的钛合金面板靶试试验, 以确定钛合金动态力学性能与其抗弹性能的内在关系, 并实现其抗弹性能的有效表征。

1 实验

实验用 TC6、TC3 钛板是由宝鸡有色金属加工厂供货, ATI425 钛合金由中航工业北京 621 研究所提供, 板材的尺寸均为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 各材料成分如表 1 所示。材料的热处理工艺及材料编号如表 2 所示, 分别为 TC61、TC62、TC3、A4251、A4252。

动态压缩实验在 $\Phi 14.5\text{ mm}$ 分离式 Hopkinson Bar 上进行, 其实验装置见图 1, 实验原理可以参阅文献 [4-6]。在实验用钛合金板材上沿着厚度方向取 $\Phi 5\text{ mm} \times$

表 1 TC6、ATI425、TC3 的化学成分

Material	Al	Cr	Mo	V	Fe	Si	Ti
TC6	6	1.5	2.5	-	0.5	0.3	Bal.
TC3	5	-	-	4	0.3	-	Bal.
ATI425	4	-	-	2.5	0.5	-	Bal.

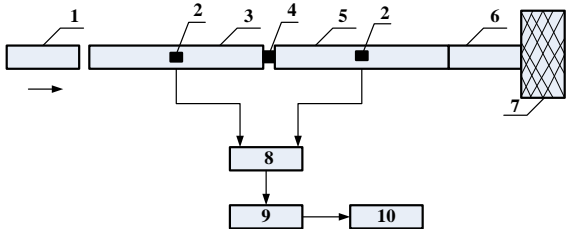
收稿日期: 2014-11-15

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-12-0051)

作者简介: 高瑞华, 男, 1988 年生, 硕士, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, 电话: 010-68911144, E-mail: 820772433@qq.com

表 2 热处理工艺参数

No.	Material	Heat treatment
TC61	TC6	900 °C/2 h/AQ+580 °C/5 h/AQ
TC62	TC6	Original supply state
TC3	TC3	Original supply state
A4251	ATI425	840 °C/2 h/AQ+700 °C/5 h/AQ
A4252	ATI425	840 °C/2 h/AQ+500 °C/5 h/AQ



1-Impact bar; 2-Strain gauge; 3-Input bar; 4-Sample; 5-Output bar; 6-Absorbing bar; 7-Damper; 8-Strain measuring device; 9-Waveform storage device; 10-Data processing system

图 1 Hopkinson Bar 装置示意图

Fig.1 Scheme of Hopkinson Bar

5 mm 的圆柱体试样, 进行动态压缩试验。采用 200 mm 撞击杆, 打击气压为 5 MPa, 应变率为 3000 s⁻¹, 计算获得试样在动态轴向压缩加载条件下的真应力-真应变曲线。并基于动态(σ-ε)曲线, 计算均匀塑性变形阶段的平均应力来表征动态强度 σ_d; 应力陡然下降的点为试样发生剪切破坏的临界点, 以该点的临界应变 ε_{cr} 表征动态塑性的大小; 在应变 0~ε_{cr} 范围内进行应力和应变的积分作为冲击吸收功 E, 来表征材料动态力学性能的优劣^[7], 见公式(1)。

$$E = \int_0^{\epsilon_{cr}} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

在中科院力学所穿甲试验室内靶道进行钛合金装甲板弹道试验, 采用 54 式 7.62 mm 穿甲弹侵彻靶板。弹体速度通过装药量来控制, 利用电子测速仪测得子弹穿甲速度约为 740 m/s。面板为钛合金板, 靶板尺寸为 150 mm×150 mm×12 mm, 靶板垂直布置, 后方装有背板(基准靶板), 背板材料均为 A3 钢, 厚度为 23 mm。本试验通过测量基准靶板的残余穿深 (depth of penetration, DOP)来评定材料的抗弹能力。

2 结果与分析

编号为 TC61、TC62、TC3、A4251、A4252 的 5 种 Φ5 mm×5 mm 圆柱形标样, 经 3000 s⁻¹ 的应变率压缩后, 回收试样的宏观照片如图 2 所示。由图 2 可知, 在 3000 s⁻¹ 应变率条件下, 试样断裂失效方向沿着最大剪

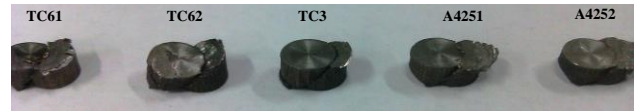


图 2 5 个编号试样在应变率为 3000 s⁻¹ 下的变形与断裂

Fig.2 Plastic deformation and fracture of five species at 3000 s⁻¹ strain rate

应力方向, 即与圆柱试样轴线成 45° 方向, 属于典型的剪切断裂。

各试样动态真应力-真应变(σ-ε)曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, 动态真应力-真应变(σ-ε)曲线大致可分为弹性阶段和塑性阶段, 没有出现明显的屈服平台。在屈服以后, 随着塑性变形的增加, 5 种试样的动态流变应力均无明显增加, 说明这 5 种试样在高应变率条件下的应变强化效应不明显。

结合图 3 的应力应变曲线, 计算 5 种试样在 3000 s⁻¹ 应变率加载条件下的动态强度(σ_d)、临界断裂应变(ε_{cr})和冲击吸收功(E), 并将相应的值及靶试试验 A3 钢的残余穿深(DOP)的值列于表 3。

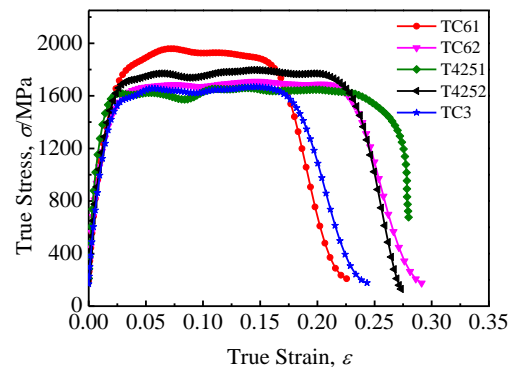


图 3 编号为 TC61、TC62、A4251、A4252、TC3 试样的动态真应力-应变 (σ-ε) 曲线

Fig.3 True stress-strain (σ-ε) curves at 3000 s⁻¹ strain rate for TC61, TC62, A4251, A4252, and TC3

表 3 不同试样对应的动态强度 σ_d、动态塑性 ε_{cr}、冲击功 E、残余穿深 DOP

Table 3 Dynamic strength, plasticity, impact absorbed energy and DOP for TC61, TC62, A4251, A4252, and TC3

No.	σ _d /MPa	ε _{cr} /%	E/MJ m ⁻³	DOP/mm
TC61	1942	15.0	289	4.07
TC62	1684	21.5	362	4.76
TC3	1655	17.8	293	6.27
A4251	1642	25.1	412	4.76
A4252	1765	21.5	379	4.42

由表 3 可知, 在 3000 s^{-1} 应变率加载条件下, TC61 具有最高的动态强度, 高达 1942 MPa , 同时具有最低动态塑性及冲击吸收功, 分别为 15% 和 289 MJ m^{-3} ; A4251 的动态塑性和冲击吸收功最大, 动态塑性为 25.1% , 冲击吸收功为 412 MJ m^{-3} 。比较不同材料对应 A3 钢的残余穿深 DOP, 编号为 TC61 的钛合金作面板时后效钢板的穿深最小, 为 4.07 mm , 表明该钛合金材料的抗弹性能最好。

同时分析了钛合金面板的正面及背面宏观损伤形貌, 如图 4 所示, 发现在 7.62 mm 穿甲弹以 740 m/s 的速度侵彻条件下, 钛合金面板均被完全穿透。所有材料中, TC61 的钛合金靶板正面开坑较大, 尺寸约为 $13 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 出现崩落造成孔壁凹凸不平, 未造成严重的冲塞破坏, 同时背面没有翻唇现象, 背凸不明显, 这些现象均使得弹体侵彻靶板的过程中消耗更多的能量, 利于靶板抗弹性能的提高。相比较而言, 其它编号的钛合金正面开坑都没有 TC61 明显, 同时靶板背面都出现不同程度的背凸和翻唇现象, TC3 的翻唇现象表现得最为显著。TC3 靶板的孔壁光滑, 为典型的绝热剪切冲塞破坏, 装甲出现冲塞破坏现象时, 装甲吸收弹丸的能量远低于塑性破坏吸收的能量, 对弹丸的阻力大大减小, 冲塞的形成往往意味着靶材防护性能的彻底丧失。因此, TC3 钛合金靶板的防护系数最小, 其抗弹性能最差。

分析表 3 中钛合金动态力学性能和残余穿深可以看出, 当动态强度一定时, 动塑性越高抗弹性能越高; 当动塑性一定时, 动态强度越高, 则抗弹性能越高, 说明钛合金的抗弹性能与动态强度和动态塑性均密切相关。TC3 和 A4251 的动态强度相差不大, 而 A4251 的动态塑性高出 TC3 约 8% , 表现出来的背板残余穿深是 A4251 低于前者 1.51 mm , 说明动态塑性变化影响了钛合金的抗弹能力。同样 TC62 与 A4252 相比, 两者的动态塑性同为 21.5% , 但由于前者的动态强度比后者低 81 MPa , 表现出来的背板残余穿深高于后者 0.34 mm , 动态强度的不同影响了抗弹性能的优劣。

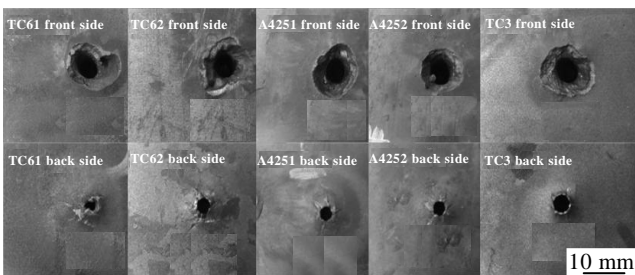


图 4 钛合金靶板正面和背面的损伤情况

Fig.4 Damage situation of the front side and back side of titanium ally targets

同样也可以发现, 表征材料动态压缩条件吸收冲击能大小的物理量 (E) 发生变化时, 也会影响钛合金的抗弹性能。但是, 随着冲击功 (E) 的增大, 背板穿深呈现出上下波动的特征, 而非单调递减, 表明冲击功 (E) 的大小并不与其抗弹性能的优劣直接对应。TC61 的冲击功为 289 MJ m^{-3} , 在实验的 5 个编号中最小, 背板穿深却最低, 仅 4.07 mm 。同样, TC62 与 A4251 作为面板时的残余穿深同为 4.76 mm , 但是两者的冲击功 (E) 相差 50 MJ m^{-3} , 进一步说明冲击吸收功 (E) 的大小不能直接用来表征钛合金作为面板时的抗弹性能。

分析钛合金抗弹性能与动态强度和塑性的关系可以发现, 钛合金的动态强度对材料抗弹性能的影响比动态塑性更加显著, 其抗弹性能主要受动态强度控制。对比 TC61 和其它 4 种编号的材料, TC61 的动态塑性和冲击功都为最低, 但作为面板时的抗弹性能最优, 其主要原因是 TC61 的动态强度高达 1942 MPa , 在所有试样中最高, TC61 的高动态强度在抵抗弹体侵彻时起到了决定性的作用。比较 TC61 和 A4251 可以看出, 后者的动态塑性高出前者约 0.1 , 占前者的比例高达 62% ; TC61 的动态强度高出 A4251 的部分 (300 MPa) 占后者的比例不足 19% , 但靶试试验的结果是 TC61 的抗弹能力显著优于 A4251, 该现象也表明钛合金作面板时的抗弹性能主要受动态强度控制。弹体在进入靶板过程中, 由于 TC61 材料的高动态强度特性, 塑性扩孔变得更加困难。同时, 弹体的能量消耗也进一步增大, 表现为弹体速度迅速下降, 从而有利于改善靶板材料的防护性能。此外, TC61 的高强度也减少了绝热剪切冲塞破坏的发生, 增加了塑性破坏吸收的能量, 提高了抗弹性能。

3 结 论

1) 钛合金作为面板时的抗弹性能与其动态强度和动态塑性均密切相关。当动态塑性一定时, 随着动态强度的增加抗弹性能提高; 当动态强度一定时, 随着动态塑性的增加抗弹性能提高。

2) 冲击吸收功的大小与钛合金面板的抗弹性能优劣没有直接关系, 不能用冲击吸收功来表征钛合金的抗弹能力。随着冲击吸收功的增加, 抗弹性能处于波动的状态, 冲击吸收功与抗弹性能没有直接关系。

3) 钛合金作面板时的抗弹性能主要受动态强度控制, 动态强度对材料抗弹性能的影响比动态塑性更加显著。高的动态强度可以增加靶板的正面开坑现象, 增大塑性扩孔的困难程度, 减少绝热剪切冲塞破坏的发生, 从而有效降低了弹体速度, 提高其抗弹性能。

- [1] Zhou Wei(周 伟), Ge Peng(葛 鹏), Xin Haiying(辛海鹰) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(4): 781
- [2] Hu Qingxiong(胡清熊). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2003, 20(4): 14
- [3] Sukumar G *et al.* *International Journal of Impact Engineering* [J], 2012, 54: 152
- [4] Lu Shouke(路守克) Shi Guochuan(史国川), Chen Xia(陈 侠). *Computer Development and Application*(电脑开发与应用)[J], 2010, 23(9): 47
- [5] Zhao Shougen(赵寿根), He Zhu(何 著), Yang Jialing(杨嘉陵) *et al.* *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*(北京航空航天大学学报)[J], 2007, 33(8): 983
- [6] Yao Juncheng(姚俊呈), Wen Lifang(文丽芳), Han Shoubo(韩寿波) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料与工程)[J], 2006(6): 47
- [7] Liu Qinghua(刘清华), Hui Songxiao(惠松骁), Ye Wenjun(叶文君) *et al.* *Chinese Journal of Rare Metal*(稀有金属)[J], 2012, 36(4): 520

Relationship between Dynamic Compressive Mechanical Properties and Ballistic Performance of Titanium Armor Materials

Gao Ruihua¹, Fan Qunbo¹, Wang Fuchi¹, Zhang Yipeng¹, Huo Lirui¹, Pei Chuanhu²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Dynamic compression experiments have been conducted for TC6 titanium alloy, ATI425 titanium alloy and TC3 titanium alloy by a split Hopkinson Bar process. These titanium alloys were prepared by different heat treatment processes, and the size of cylindrical standard samples was $\Phi 5$ mm \times 5 mm. On the basis of the dynamic compression experiments, the dynamic strength, plasticity and impact absorbed energy under the strain rate of 3000 s^{-1} were obtained. Meanwhile, the ballistic performance test was carried out. The armor targets were made up of a titanium panel and a A3 steel backplane. Therefore, the relationship between dynamic mechanical properties and ballistic performance of titanium alloys can be revealed. The results show that the ballistic performance of titanium panel is closely related to its dynamic strength and plasticity. Noticeably, the influence of dynamic strength on ballistic performance is more significant than that of dynamic plasticity; the ballistic performance is mainly determined by dynamic strength. Meanwhile, the impact absorbed energy cannot directly reflect ballistic performance of titanium alloy, and a large front crater and smaller plugging destroy can significantly improve the ballistic performance of titanium panel.

Key words: titanium alloy; ballistic performance; dynamic strength; dynamic plasticity; impact absorbed energy

Corresponding author: Fan Qunbo, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68911144, E-mail: fanqunbo@bit.edu.cn