

复合装甲防护材料对其抗弹性能影响研究

徐海^{1*}, 岳文泉², 权国政³

(1. 潍坊学院, 山东 潍坊 261061; 2. 潍坊路加精工有限公司, 山东 潍坊 261061;

3. 重庆大学, 重庆 400044)

摘要: **目的** 复合装甲防护材料是影响其抗弹效应的重要影响因素, 合理应用防护材料可在质量、尺寸等约束条件限制下, 大幅度提高复合装甲的抗弹能力。**方法** 针对装甲车辆不同角度的防护需求, 通过建立不同防护材料组成的复合装甲仿真模型, 研究其在不同角度下抗弹性能, 并通过靶试试验验证模型的有效性。**结果** 在 100 mm、防 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹, 陶瓷复合装甲抗弹性能随着入射角的增大先高于钛合金复合装甲, 后逐渐下降, 当入射角达到 45° 时, 陶瓷复合板的抗弹性能接近于钛合金复合板, 随着角度的继续增大, 钛合金复合板的抗弹性能逐渐优于陶瓷复合板。**结论** 通过在 100 m 射距、48° 法线角下的陶瓷及钛合金防护复合装甲靶试试验, 验证所建立仿真模型的有效性, 进而后续复合装甲抗弹性能设计研究, 可基于仿真模型确立最优包装材料及其结构, 减少靶试试验, 提高设计效率及增加经济效应。

关键词: 陶瓷组成复合装甲; 钛合金组成复合装甲; 抗弹性能; 仿真模型

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)21-0268-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.036

Effect of Composite Armor Protective Materials on Their Anti-Ballistic Performance

XU Hai^{1*}, YUE Wenquan², QUAN Guozheng³

(1. Weifang University, Shandong Weifang 261061, China; 2. Weifang Lukomo Precision Co., Ltd., Shandong Weifang 261061, China; 3. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Composite armor protective materials are an important factor affecting their anti-ballistic effect. Therefore, the reasonable application of protective materials can significantly improve the anti-ballistic capability of composite armor under constraints such as weight and size. In response to the protection requirements of armored vehicles from different angles, a composite armor simulation model composed of different protective materials was established to study the ballistic performance of materials at different angles, and the effectiveness of the model was verified through target test. For 54 type 12.7 mm armor piercing incendiary shells at 100 mm, the anti-ballistic performance of ceramic composite armor was firstly higher than that of titanium alloy composite armor with increasing incident angle, and then gradually decreased. When the incident angle reached 45°, the anti-ballistic performance of ceramic composite plate was close to that of titanium alloy composite plate. As the angle continued to increase, the anti-ballistic performance of titanium alloy composite plate gradually became better than that of ceramic composite plate. By conducting target tests on ceramic and titanium alloy protective composite armor at a normal angle of 100 m/48°, the effectiveness of the established simulation model is verified. Subsequently, the research on the ballistic performance design of composite armor can be conducted, and the optimal packaging material and structure can be established based on the simulation model to reduce target test,

收稿日期: 2024-09-26

基金项目: 国家自然科学基金 (52175287)

*通信作者

improve design efficiency, and increase economic benefits.

KEY WORDS: ceramic composite armor; titanium alloy composite armor; anti-ballistic performance; simulation model

质量控制已成为装备研制的“瓶颈”, 如何增强防护、更好地减轻车体质量, 是坦克装甲车辆发展的重大关键性技术问题^[1]。采用优良抗弹性能的轻质包装材料^[2-6]是解决这一问题的关键, 因此复合装甲材料对其抗弹性能的影响引起了国内外工程学者的广泛研究^[7-10]。

王海福等^[11]以钛合金组成复合装甲板为研究对象, 利用球形破片弹进行撞击以测试其极限速度。陈立等^[12]研究了长杆弹撞击钛合金板的绝热剪切冲塞效应。李树涛等^[13]利用 AUTODYN 仿真软件对不同厚度的钛合金进行靶试模拟计算, 得出了钛合金包装板的厚度效应规律。苗成等^[14]利用 12.7 mm 穿甲燃烧弹撞击不同厚度的钛合金包装复合板, 得出了钛合金靶板厚度与其防护性能之间的关系。周伟等^[15]对钛合金组成板进行撞击试验, 总结出了钛合金防护板的侵彻损伤行为。

综上所述, 国内外学者针对防护材料和包装复合板对其抗弹性能影响的研究取得了重大突破, 然而针对轮式装甲突击车不同角度下防护的需求, 如何在不同角度下合理使用复合装甲防护材料, 使复合装甲在同等防护下实现轻量化鲜见报道。因此, 本文以如何合理使用复合装甲组件为重点, 开展陶瓷复合装甲与钛合金复合装甲在不同角度下的抗弹性能研究, 分别建立陶瓷及钛合金复合装甲抗弹仿真模型, 从穿深曲线图、总能量衰减图、侵彻速度图对比分析陶瓷及钛合金复合装甲在不同角度下的抗弹机理, 定量分析不同角度下钛合金与陶瓷复合装甲抗弹性能的差异, 最终使得复合装甲在同等防护下实现轻量化。

1 复合装甲抗弹仿真模型建立及计算

在 4×4 轮式装甲车复合装甲研制中发现, 正面首下陶瓷复合装甲与装甲钢基体组合后, 在 100 m 射距、45°法线角条件下, 其防 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹的防护效益低于钛合金复合装甲与装甲钢基体组合方案的, 因此本文以 8×8 轮式装甲车为研究对象, 开展陶瓷复合装甲与钛合金复合装甲防 12.7 mm 穿甲燃烧弹角度效应研究, 为后续复合装甲设计提供技术支撑。

1.1 钛合金及陶瓷材料结构参数

本文所采用的钛合金为 TC4, 其组成为 Ti-6Al-4V, 属于 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 具有良好的综合力学机械性能, 比强度大, TC4 的强度为 0.012 GPa, 密度为 4.51 g/cm³, 比强度为 23.5, 热导率为 7.955 W/(m·K)。所采用的陶瓷为碳化硅陶瓷, 其密度为 3.2 g/cm³, 弹性模量为 350 GPa, 杨氏模量为 500 GPa。

1.2 复合装甲板仿真结构设计

本文采用改进的 Florence 模型对陶瓷及钛合金复合装甲结构进行设计计算。该模型是 Florence 设计模型的改进型, 在 Ben-Dor 等^[16]相关科学家理论研究的基础上, 将实际弹靶过程中陶瓷受到弹丸冲击时产生的表面驻留效应引入 Florence 模型, 得到改进公式为:

$$h_1 / h_2 = \lambda \quad (1)$$

$$a = a_p + 2h_1 \quad (2)$$

$$f(a) = \frac{m_p}{[m_p + (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_1 / \lambda) \pi a^2] \pi a^2} \quad (3)$$

式中: a 为断裂半径, h 为厚度, a_p 为弹丸半径, m_p 为弹丸质量。

在考虑表面驻留效应的 Florence 改进模型中, 弹靶作用时发生表面驻留是一种高的耗能形式, 表现为弹体质量减少、速度下降, 弹体动能迅速消耗。因此在包装复合板结构设计中, 必须调整 λ 以使包装结构靶板能够充分并高效利用表面驻留效应。

1) 预估复合装甲中基体穿透的极限速度。在延性穿透刚开始时有:

$$E_c = K' k_1 f_H \sigma_{st} \pi b d k_2 \sqrt{db} \quad (4)$$

式中: E_c 为弹丸动能, k_1 、 f_H 、 k_2 为系数, d 为直径, b 为包装复合板厚度, σ_{st} 为包装复合板屈服强度。由能量守恒定律可知:

$$E_c = m v_{ip}^2 / 2 \quad (5)$$

式中: v_{ip} 为弹丸穿透包装复合装甲的极限速度。将式 (5) 代入式 (4) 可得:

$$m v_{ip}^2 / 2 = K' k_1 f_H \sigma_{st} \pi b d k_2 \sqrt{db} \quad (6)$$

由此可得抗弹复合装甲产生充塞破坏所需的极限速度 v_{ip} 可表示为:

$$v_{ip} = K d^{0.75} b^{0.75} / m^{0.5} \quad (7)$$

$$K = \sqrt{2 K' k_1 k_2 \pi \sigma_{st} f_H} \quad (8)$$

2) 计算陶瓷及钛合金包装复合装甲吸收弹丸的能量和速度。应用能量守恒定律, E_f 可表示为:

$$E_f = m v_{ip}^2 / 2 - m v_{ip}^2 / 2 \quad (9)$$

式中: v_{ip} 为弹丸的初始速度, v_{ip} 为弹丸穿透包装复合装甲的极限速度。

2 复合装抗弹性能模拟仿真与分析

首先分别建立 14 mm SiC 及 10 mm TC4 与 4.5 mm 6252 装甲钢基体组合, 在 100 m 射距、48°法线角条件下, 防 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹仿真模型如图 1

所示。通过仿真计算,可得出钛合金组成复合板与陶瓷组成复合板在不同时刻下弹丸的穿深曲线、总能量衰减、侵彻速度,如图2~4所示。

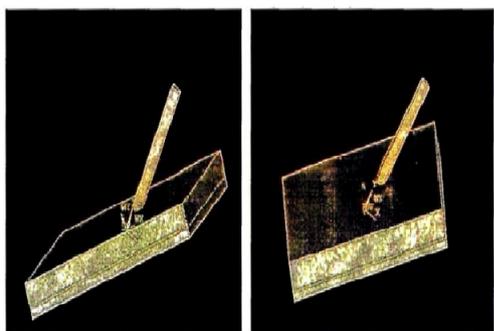


图1 48°入射角下钛合金及陶瓷复合板仿真模型

Fig.1 Simulation model of titanium alloy and ceramic composite plate at 48° incident angle

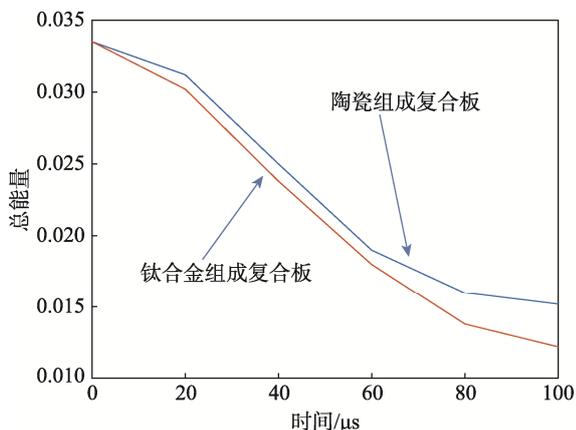


图2 48°入射角下陶瓷及钛合金复合板总能量减曲线图

Fig.2 Total energy attenuation curve of ceramic and titanium alloy composite plate at 48° incident angle

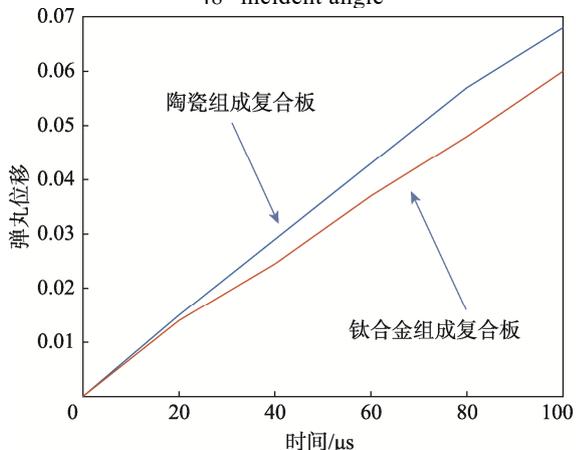


图3 48°入射角下陶瓷及钛合金复合板弹丸位移曲线图

Fig.3 Displacement curve of ceramic and titanium alloy composite plate bullet at 48° incident angle

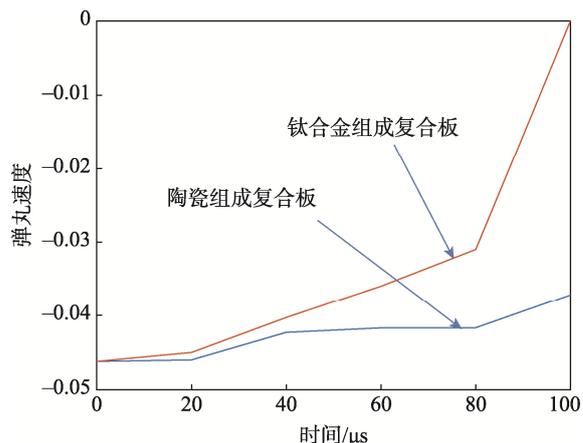


图4 48°入射角下陶瓷及钛合金复合板弹丸速度曲线图

Fig.4 Velocity curve of ceramic and titanium alloy composite plate bullet at 48° incident angle

基于上述模型,分别建立陶瓷及钛合金组成板在半无限靶板作用下的仿真模型,如图5~7所示。

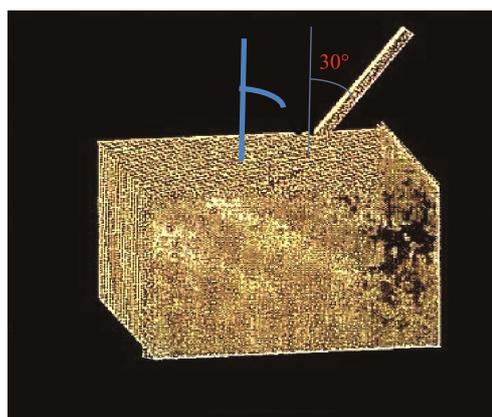


图5 30°入射角下钛合金及陶瓷复合板仿真模型

Fig.5 Simulation model of titanium alloy and ceramic composite plate at 30° incident angle

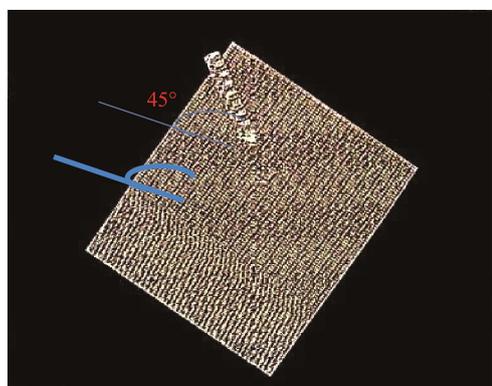


图6 45°入射角下钛合金及陶瓷复合板仿真模型

Fig.6 Simulation model of titanium alloy and ceramic composite plate at 45° incident angle

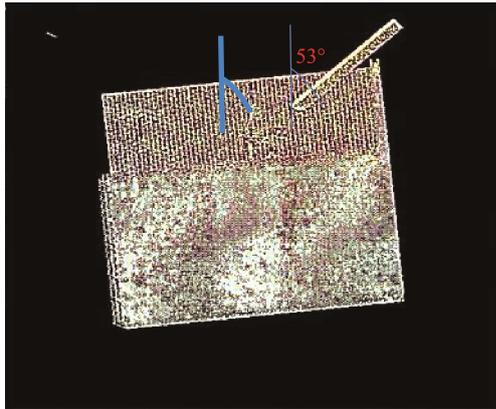


图 7 53°入射角下钛合金及陶瓷复合板仿真模型

Fig.7 Simulation model of titanium alloy and ceramic composite plate at 53° incident angle

通过仿真计算,从总能量衰减图对比分析陶瓷与钛合金组成复合装甲在不同角度下的抗弹性能,并定量分析在不同角度下 2 种不同组成复合装甲抗弹性能的差异,如图 8 所示。

从图 8a 中可以得出:在着靶 100 μs 内,弹丸在

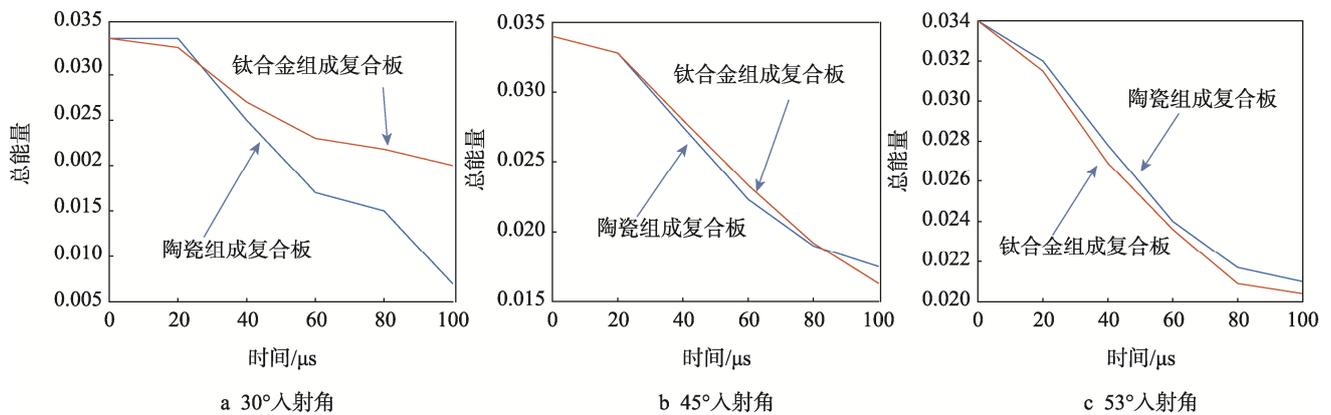


图 8 不同角度下陶瓷及钛合金复合板弹丸总能量衰减曲线图(半无限厚靶板)

Fig.8 Curve of total energy attenuation of ceramic and titanium alloy composite plate bullets at different angles (semi-infinite thickness target plate)

3 陶瓷及钛合金复合板靶试试验验证

为验证仿真模型的有效性,基于所建立的在 100 m 射距、48°法线角条件下,防 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹的仿真模型,分别对陶瓷组成复合结构(14 mm SiC+4.5 mm 6252 装甲钢)及钛合金组成复合结构(10 mm TC4+4.5 mm 6252 装甲钢)开展靶试试验,其试验结果如表 1、表 2 及图 9、图 10 所示。

从靶试试验结果中可以得出:钛合金复合装甲在 100 m 射距、48°法线角条件下,可有效防 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹,而相同面密度下的陶瓷复合装甲却未能有效防住。由此可说明,该角度下陶瓷组成复合板的

陶瓷包装复合板中的总能量衰减值大于在钛合金复合板中的值,由此可知在 100 m 射距、30°法线角条件下,陶瓷组成复合板防 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹的防护效益高于钛合金组成复合板,因此在此角度下应用陶瓷防护仍可明显提高复合装甲防护性能。

从图 8b 中可以得出:在着靶 100 μs 内,弹丸在陶瓷包装复合板中的总能量衰减值接近于在钛合金复合板中的值,但弹丸在陶瓷组成复合板中的总能量衰减值下降明显小于在入射角为 30°时陶瓷复合板中的值,由此可知在 100 m 射距、45°法线角条件下,陶瓷组成复合板防 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹的防护效益接近于钛合金组成复合板,且其防护效益较 30°时明显下降,因此在此角度下应用陶瓷防护仍可略微提高复合装甲防护性能。

从图 8c 中可以得出:在着靶 100 μs 内,弹丸在钛合金组成复合板中的总能量衰减值略微大于在陶瓷组成复合板中的值,由此可知在 100 m 射距、53°法线角,钛合金组成复合板防 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹的防护效益略高于陶瓷组成复合板,因此在此角度下应用钛合金组成的防护可略微提高复合装甲防护性能。

防护效益低于钛合金组成复合板,进而证明陶瓷包装及钛合金包装复合板仿真模型的有效性。

表 1 钛合金组成复合板靶试试验记录

Tab.1 Target test record of titanium alloy composite plate

弹序	射距/m	弹速/(m·s ⁻¹)	法线角/(°)	损伤级别
1	100	807.0	48	2 级
2	100	810.8	48	2 级
3	100	829.6	48	2 级
4	100	819.0	48	2 级
5	100	841.2	48	2 级

表2 陶瓷组成复合板靶试试验记录
Tab.2 Record of target test for ceramic composite plate

弹序	射距/m	弹速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	法线角/($^{\circ}$)	损伤级别
1	100	813.0	48	2级
2	100	810.0	48	5级
3	100	814.6	48	3级
4	100	825.0	48	8级
5	100	810.0	48	8级

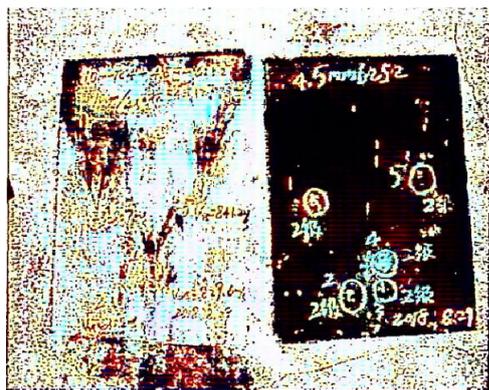


图9 48°入射角下钛合金组成复合板靶试试验图

Fig.9 Target test diagram of titanium alloy composite plate at 48° incident angle

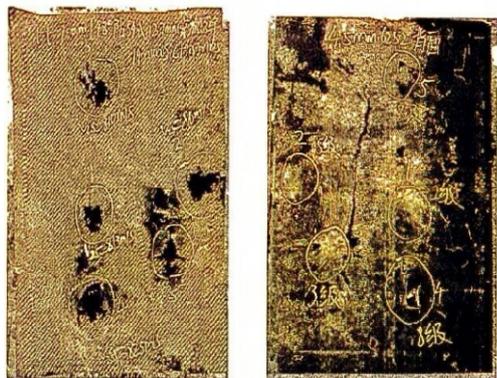


图10 48°入射角下陶瓷组成复合板靶试试验图

Fig.10 Target test diagram of ceramic composite plate at 48° incident angle

4 结语

仿真及靶试实验结果表明:在100 mm、防12.7 mm穿甲燃烧弹下,随着入射角的增大,陶瓷组成的复合板抗弹性能先高于钛合金组成的复合板,后逐渐下降,当入射角达到45°时,陶瓷组成复合板的抗弹性能接近于钛合金组成复合板,当入射角达到53°时,钛合金组成复合板的抗弹性能优于陶瓷组成复合板。

通过在100 m射距、48°法线角下的陶瓷及钛合

金组成复合装甲靶试试验,验证所建立仿真模型的有效性,进而后续复合装甲抗弹性能设计研究,可用仿真模型确立最优组成材料及其防护结构,减少靶试试验,提高设计效率及增加经济效应。

参考文献:

- [1] 曹凌宇, 罗兴柏, 刘国庆, 等. 军用装甲防护技术发展及应用[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 223-228.
CAO L Y, LUO X B, LIU G Q, et al. Development and Application of Military Armor Protection Technology[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 223-228.
- [2] 曾毅, 赵宝荣. 装甲防护材料技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
ZENG Y, ZHAO B R. Armor Protection Material Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [3] 赵旭东, 高兴勇, 刘国庆. 装甲防护材料抗侵彻性能研究现状[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 117-122.
ZHAO X D, GAO X Y, LIU G Q. Situation of Research on Anti-Penetration Performance of Armor Protective Material[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 117-122.
- [4] 刘薇, 杨军. 装甲防护材料的研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2011, 40(2): 108-111.
LIU W, YANG J. Current Status and Development of Armor Protective Material[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(2): 108-111.
- [5] 陈维平, 韩孟岩, 杨少锋. Al_2O_3 陶瓷复合材料的研究进展[J]. 材料工程, 2011, 39(3): 91-96.
CHEN W P, HAN M Y, YANG S F. Research Progress of Al_2O_3 Ceramic Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, 39(3): 91-96.
- [6] 侯海量, 朱锡, 阚于龙. 陶瓷材料抗冲击响应特性研究进展[J]. 兵工学报, 2008, 29(1): 94-99.
HOU H L, ZHU X, KAN Y L. Advance of Dynamic Behavior of Ceramic Material under the Impact of Projectile[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(1): 94-99.
- [7] 博望, 月仪. 装甲车辆被动防护方案[J]. 国外坦克, 2010(9): 48-51.
BO W, YUE Y. Passive Protection Scheme for Armored Vehicles[J]. Foreign Tank, 2010(9): 48-51.
- [8] 秦翔宇. 铝合金-高聚物层状复合靶板抗冲击性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
QIN X Y. Study on Impact Resistance of Aluminum Alloy-polymer Layered Composite Target[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [9] 尹志新, 李言语, 梁兴华, 等. 陶瓷/金属复合装甲抗侵彻研究进展[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5):

- 116-119.
YIN Z X, LI Y Y, LIANG X H, et al. Research Progress of Ceramic/Metal Composite Armor Against Ballistic Penetration[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(5): 116-119.
- [10] LIAGHAT G H, NIA A A, DAGHYANI H R, et al. Ballistic Limit Evaluation for Impact of Cylindrical Projectiles on Honeycomb Panels[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(1): 55-61.
- [11] 王海福, 刘志雄, 冯顺山. 钢球侵彻钛合金靶板弹道极限速度[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(2): 162-164.
WANG H F, LIU Z X, FENG S S. Ballistics Limit Velocity for Spherical Steel Fragments Penetrating Titanium-Alloy Target Plates[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(2): 162-164.
- [12] 陈立, 李永池, 王礼立. 长杆弹对钛合金靶的冲塞实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 217-224.
CHEN L, LI Y C, WANG L L. Experimental Study on the Impact of Long Rod Projectile on Titanium Alloy Target[J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(3): 217-224.
- [13] 李树涛, 钟涛, 陈晓军, 等. 穿甲模拟弹侵彻不同厚度钛合金靶板的数值分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(1): 57-61.
- LI S T, ZHONG T, CHEN X J, et al. Numerical Analysis of Simulated APDSFS Penetrating into Titanium Alloy Target with Different Thickness[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(1): 57-61.
- [14] 苗成, 刘江南, 钟涛, 等. 钛合金板抗 12.7 mm 穿甲燃烧弹厚度效应试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(5): 68-70.
MIAO C, LIU J N, ZHONG T, et al. Thickness Effect of Titanium Alloy Plates Against 12.7 mm API[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(5): 68-70.
- [15] 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 W, GE P, XIN H Y, 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.
- [16] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. Improved Florence Model and Optimization of Two-Component Armor Against Single Impact or Two Impacts[J]. Composite Structures, 2009, 88(1): 158-165.