

装甲防护材料抗侵彻性能研究现状

赵旭东, 高兴勇, 刘国庆
(军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: **目的** 分析装甲防护材料抗侵彻性能的研究现状, 为改进复合装甲的结构设计提供参考。**方法** 对装甲防护材料的抗侵彻研究现状进行论述, 并对其应用情况进行分析。**结果** 分别阐述了金属材料(装甲钢、铝合金和钛合金)、陶瓷复合靶板以及纤维增强复合材料(玻璃纤维、芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维)的抗侵彻研究现状, 并介绍了其应用情况。**结论** 随着战场环境的日益更新和武器装备的飞速发展, 单一的装甲防护材料已难以适应战场环境的不断变化, 装甲防护材料将朝着强韧化、轻量化、智能化及多功能化发展。

关键词: 装甲防护; 防护材料; 抗侵彻; 研究现状

中图分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0117-06

Situation of Research on Anti-penetration Performance of Armor Protective Material

ZHAO Xu-dong, GAO Xing-yong, LIU Guo-qing
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the research situation of anti-penetration performance of armor protective materials in order to provide reference for structural design of composite armor. The situation of research on anti-penetration performance of armor protective material was discussed and its application was analyzed. The situation of research on the anti-penetration and the application of metal materials (armor steel, aluminum alloy and titanium alloy), ceramic composite target plate and the fiber reinforced composite materials (glass fiber, kevlar fiber, UHMWPE fiber) were discussed and introduced. With the increasingly updated battlefield environment and rapid development of weapons and equipment, it is difficult for a single armor protective material to adapt to the changing battlefield environment. Armor protective materials will develop in direction of toughening, lightweight, intelligence and multifunction.

KEY WORDS: armor protection; protective material; anti-penetration; research situation

在现代高科技战争中, 武器装备的不断发展和战场环境的不断改变对装甲防护材料的性能提出了更高要求, 为了满足装备战场生存力的需求, 并尽可能地提升其机动性, 装甲材料体系需不断得到更新和完善。对于现代装甲材料来说, 除了要求有良好的防护能力外, 还应考虑材料的成本、密度和加工等因素, 因此装甲防护材料应具有高的抗冲击和侵彻性能以及低成本、低密度的特性。

世界各国应用比较广泛的装甲防护材料有金属防护材料、陶瓷复合材料和纤维增强复合材料等。由于防护材料自身性能的差异, 它们的抗侵彻机理也各

不相同, 因此, 研究装甲防护材料的抗侵彻机理和现状, 对改进装甲结构的设计, 促进防护材料的发展, 提高防护材料的抗冲击性能, 提高装甲防护性能等都具有重要意义。

1 金属防护材料抗侵彻

金属防护材料自研发以来, 除了在坦克、装甲车、军用运输车和舰船等军用领域, 在公安、武警防爆车、防弹盾牌、运钞车和防弹轿车等民用领域也得到了广泛的应用, 且随着装甲防护技术的迅速发展, 金属防

收稿日期: 2016-12-27

作者简介: 赵旭东(1994—), 男, 军械工程学院硕士生, 主攻弹药保障与安全性评估。

通讯作者: 高兴勇(1973—), 男, 军械工程学院教授, 主要研究方向为弹药保障与安全性评估。

护材料的硬度和强度逐渐提高,抗弹性能越来越好,防护能力不断增强。

1.1 钢装甲材料

钢装甲材料自应用以来,一直受到各国的青睐,到目前为止,仍然是应用最广泛的装甲材料。目前,尽管随着装甲防护技术的发展,出现了很多新型装甲材料,但钢装甲材料在抗弹性能和结构应用方面仍有较强优势。美国、德国、瑞典等西方国家对于性能先进的钢装甲的研究从未中断。美军现有5个超高硬装甲钢标准(MIL-A-12560H, MIL-A-46100D, MIL-DTL-46177, MRMIL-A-46186, MIL-46193A);瑞典的装甲钢则有ARMOX440T, ARMOX500T, ARMOX560T, ARMOX600T和ARMOX ADVANCE等^[1]。

侯海量等^[2]利用有限元分析软件对破片模拟弹侵彻钢板的过程进行了仿真分析,并与弹道冲击实验结果相对比,得出弹靶作用界面的速度与弹丸初速的关系:

$$u_0 = \frac{1}{2}v_0 - \frac{v}{1-2\nu} \cdot \frac{\sigma_p}{\rho v_0}$$

式中: u_0 为弹靶作用界面的初始速度; v_0 为弹丸初速; v 为弹速; ρ 为材料密度; σ_p 为弹体材料的动态屈服强度。张伟等^[3]对钢板抗平头弹侵彻性能分别进行了数值模拟和试验研究,得到了靶板弹道极限以及初始-剩余速度曲线;邓云飞等^[4-5]分别研究了半球形头弹体和平头弹体对金属板的侵彻过程,分析了靶体结构对靶体抗侵彻性能和失效模式的影响。

1.2 铝合金材料

铝合金自20世纪中期发展为装甲材料以来,在装甲防护上得到了广泛的应用。在同等防弹性能上,用铝合金装甲代替钢装甲,能减少整体质量20%左右。在等质量的情况下,其弯曲刚度是钢的9倍,因此自二战结束以后,铝合金装甲在武器装备上的应用取得了飞速的发展。美国的先进两栖装甲车AAAV就是采用的2519-T87铝合金,它不仅具有优异的抗弹性能,还具有良好的抗应力腐蚀性和优良的焊接性能。

Gupta等^[6-7]对不同条件下铝靶的抗侵彻性能进行了数值模拟和实验研究,分析了铝合金靶板的破坏模式和抗侵彻性能的影响因素;魏刚等^[8]通过试验和数值模拟结合的方法,研究了2种强度铝合金板抗刚性杆弹撞击侵彻性能,分析了铝合金靶板的破坏机理;刘文辉等^[9]对斜侵彻铝合金靶板的过程进行了仿真分析,分析了影响子弹运动轨迹和靶板变形的因素,并进行了试验验证;朱峰等^[10]通过数值模拟研究了弹丸侵彻铝铁复合靶板的过程,分析了叠放厚度和弹丸初速对复合材料板防护性能的影响。

1.3 钛合金材料

钛合金具有比强度高、密度低、抗冲击性强及较好的塑韧性等良好的综合性能。与传统装甲钢相比,钛合金的密度是装甲钢的57%,等质量情况下可以提高防护性能30%以上。钛合金还具有良好的低温韧性,从而保证了低温抗弹性能,是性能优异的装甲防护材料。由于钛合金的价格约为普通钢装甲的10~15倍,并且生产工艺复杂,加工困难,所以限制了它的推广应用。

Korneckil等^[11]通过试验和仿真分析了不同长径比的钛合金破片侵彻钛合金靶板的过程,并验证了其本构模型;曾刚等^[12]利用AUTODYN软件对钢球侵彻钛靶板过程进行了仿真,通过改变钢球尺寸和靶板结构,计算出不同情况下靶板的极限穿深和弹道极限速度,验证了材料模型的可靠性;李树涛等^[13]通过AUTODYN大口径钨合金穿甲弹侵彻钛合金靶板过程进行了仿真分析,得出了靶板厚度与相对防护系数间的关系。

2 陶瓷复合靶板抗侵彻

陶瓷材料具有低密度、高模量、高硬度、高压缩强度以及优良的抗弹性能和丰富的资源等特点,因此是一种有发展前景的高性能装甲材料^[14]。陶瓷材料作为装甲材料,主要是和金属或者复合材料组成复合装甲或复合装甲中的抗弹陶瓷单元,如美国的CAVATD和M1坦克系列。

Wilkins^[15-17]等利用实验分析了陶瓷复合靶板的抗弹机理,研究了子弹穿透靶板的极限速度,结果证明陶瓷复合结构抗弹性能较好;Meyers等^[18]通过实验分析了弹体磨蚀和面板破碎的耗能规律,以及弹体速度对复合靶板防护性能的影响;Woodward等^[19-20]进行了陶瓷复合靶板抗APP子弹的实验研究,分析了陶瓷复合板的耗能机理,讨论了复合靶板盖板、弹体头部形状和靶板材料参数对靶板抗弹性能的影响;Hetherington^[21]在给定陶瓷复合靶板面密度的条件下,建立了面板和背板厚度比的优化公式:

$$\frac{d_c}{d_b} = \frac{\rho_b(r-r_p)}{2\rho - \rho_c(r-r_p)}$$

式中: d_c , d_b 分别为面板和背板的厚度; ρ_c , ρ_b 分别为面板和背板的密度; ρ 为复合装甲面密度; r_p 为弹体半径; 大多数情况下, $r=0.8(r_p+2\rho/\rho_c)$ 。Yadav等^[22]通过长杆弹侵彻试验,研究了陶瓷铝合金复合靶板的抗侵彻性能,研究发现,在一定条件下,分层陶瓷复合板的防护性能更佳;Goncalves等^[23]利用理论分析模型研究了弹丸侵彻陶瓷/金属装甲后损失的质量和速度,同时还研究了陶瓷材料晶粒尺寸对抗侵彻

性能的影响; Madhu 等^[24]研究了不同纯度的陶瓷板抗 12.7 mm 穿甲弹侵彻性能试验, 通过给定的弹道效率因子, 得出陶瓷板纯度越高, 防护性能越好。

20 世纪 80 年代, 国内也开始了对陶瓷复合结构的研究。王文俊^[25]以实弹靶试结果为依据, 通过观察分析了陶瓷复合材料/复合装甲受穿甲弹冲击后的破坏形貌, 分析了复合装甲的抗弹机理, 并研究了该种装甲防弹性能的理论估算; 仲伟虹等^[26]从弹道实验出发, 对陶瓷/复合材料装甲的抗弹机理进行了研究, 分析了面板、背板的断裂形貌及其在整个复合装甲系统中的作用; 杜忠华等^[27]深入研究了多种轻质陶瓷复合靶板的抗弹性能, 分析和讨论了它们的损伤机理、靶板配置及优化设计, 同时针对冲击载荷作用下陶瓷面板的破坏特点, 分析了陶瓷破碎锥角的形成机理; 侯海量、朱锡等^[28—29]对轻型陶瓷复合装甲抗弹性能进行了实验研究, 从靶板的材料、约束条件和结构配置, 以及弹体入射角度、冲击速度和弹丸形状等方面分析了轻型陶瓷复合装甲抗弹性能的影响因素; 熊冉等^[30]利用 LS-DYNA 根据终点效应关系及穿深因子建立了杆式穿甲弹在不同初速下钢/陶瓷/钢复合靶的等效均质靶板结构; 马天宝等^[31]在质点网格法的基础上, 提出了用于模拟高速冲击、侵彻问题的质点映射算法, 进一步分析了在相同初速下, 陶瓷层厚度对陶瓷复合靶防护系数的影响规律。

3 纤维增强复合材料抗侵彻

纤维增强复合材料具有抗拉强度高、质轻的特点, 通常作为背板或夹层, 与金属材料或陶瓷板组成复合靶板^[32]。目前, 在装甲防护中应用最多的纤维增强复合材料分别是玻璃纤维、芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维。

3.1 玻璃纤维

20 世纪 40 年代, 国外开始将玻璃纤维材料应用到装甲防护上。玻璃纤维复合材料是第 1 代装甲防护用抗弹复合材料, 其比强度高, 价格较低廉, 密度比金属低, 具有较高的抗拉强度。20 世纪 80 年代初, 美国研制成功了以 S-2 高强玻璃纤维增强的树脂基复合材料, 证明该材料具有优良的比承载性能、比防护性能, 可以作为轻型装甲车辆的基体装甲结构。美国形成了该材料的军用标准 (MIL 46197), 并在后续对该标准进行了修改和完善 (MIL 46197A)。该类型玻璃纤维复合材料已用于美国 Humvee 高机动多用途轮式车辆、CAV-1000 装甲车的车身装甲^[33]。

Wang 等^[34]通过弹道试验利用 7.62 mm 穿甲弹以低速侵彻钢/玻璃纤维复合靶, 研究了玻璃纤维增强复合材料的吸能特性; 杜忠华等^[35]对玻璃纤维层合板

抗弹性能进行了实验研究, 得出了纤维复合材料弹道性能 v_{50} 的计算公式:

$$v_{50} = \frac{0.07(1-\mu^2)\sigma_T(3.5h_0+0.6D)(5h_0+1.2D)^2}{(mEh_0^3)^{1/2}}$$

式中: v_{50} 为弹道极限速度; μ 为材料的泊松比; σ_T 为背板的动态屈服应力; D 和 m 分别为弹径和质量; E 为材料的弹性模量。徐豫新等^[36]通过破片模拟弹丸高速撞击玻璃纤维三明治板实验, 研究了钢板-玻璃纤维-钢板构成的三明治结构对破片的防护性能, 分析了结构特征对靶板比吸收能的影响。

3.2 芳纶纤维

芳纶纤维包括对位芳纶纤维和间位芳纶纤维, 其中在抗弹复合材料领域应用的主要是对位芳纶纤维^[37]。对位芳纶纤维具有刚棒形的分子结构和高度取向的分子链结构, 赋予纤维高强度、高模量、耐高温特性, 同时还具有耐化学腐蚀、耐疲劳等优点, 是一种理想的抗弹材料^[38—39]。

Gower 等^[40]通过试验与仿真研究了 kevlar 29 与 kevlar 129 层合板在低速 (<300 m/s) 非变形弹丸弹道冲击下的位移与动态响应; 李硕等^[41]对破片模拟弹侵彻芳纶层合板的过程进行了试验分析, 研究了其防护性能, 得到了破片余速和极限速度的经验关系式; 徐豫新等^[42]分别利用弹道侵彻试验与数值仿真研究了钢/芳纶/钢三明治结构对破片模拟弹的防护性能, 分析了结构特征对靶板结构比吸收能的影响, 并通过仿真进一步分析了破片弹道极限条件下各层靶板吸能比率与靶板大小的关系; 李树虎等^[43]仿真分析了芳纶纤维复合材料靶板的抗侵彻过程, 研究了弹体形状和速度对靶板防护性能的影响; 赵晓旭等^[44]对钢/芳纶纤维的 2 种结构复合板进行弹速侵彻试验, 分析了弹体对前置钢板与后置芳纶纤维板的破坏模式及钢/芳纶复合板的弹道吸能机制。

3.3 超高分子量聚乙烯纤维

超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 纤维是所有高强高模纤维中密度最小的纤维, 与芳纶纤维相比, UHMWPE 纤维具有更高的强度、模量、比强度、比模量及声波传递速度, 其耐气候老化性也优于芳纶纤维, 并且不吸水、不吸潮, 因而对环境的适应性更好。其缺点是纤维的耐热性低和阻燃性较差^[45—46]。

Grujicic 等^[47]通过试验与数值仿真研究了 UHMWPE 板的材料模型对其损伤等级的影响; Fazal 等^[48]研究了 UHMWPE 纤维复合材料的冲击性能, 并发现剥离纤维的内芯接口时, 其表面区域具有较低的刚度和长期的粘弹性行为; Rosso 等^[49]采用弹道冲击试验发射 7.94 mm 弹丸侵彻不同结构、不同编织角和不同材料, 并采用高速摄影机记录撞击试验; 毛亮^[50]

利用侵彻试验, 分析了弹道极限速度 v_{50} 与靶板面密度之间的关系, 并得到了 v_{50} 的预测公式:

$$v_{50} = 423 \left(\frac{d_{cl}}{D_p} \right)^{0.6} \left(\frac{d_{fl}}{D_p} \right)^{2.41}$$

式中: d_{cl} 和 d_{fl} 分别为面板和背板厚度; D_p 为破片直径。陈晓等^[51]采用 LS-DYNA 软件模拟了 UHMWPE 板的抗弹道侵彻过程, 结合实验分析了叠层靶板的破坏机理及吸能方式, 并对靶板的选材、铺层顺序、层数等提出了相应建议。

4 结语

随着战场环境的日益更新和武器装备的飞速发展, 单一的装甲防护材料已难以适应战场环境和作战任务需求的不断变化, 因此这大大促进了新的装甲防护材料的发展。装甲防护材料将朝着强韧化、轻量化、智能化及多功能化发展。随着新型结构材料的出现及先进技术的应用, 装甲材料必将同步地得到改进和更新, 装甲防护能力也将不断提高。

参考文献:

- [1] 曹贺全, 张广明, 孙素杰, 等. 装甲车辆防护技术研究现状与发展[J]. 兵工学报, 2012, 33(12): 1549—1554.
CAO He-quan, ZHANG Guang-ming, SUN Su-jie, et al. Status and Development of Protection Technology of Armored Vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(12): 1549—1554.
- [2] 侯海量, 朱锡, 谷美邦, 等. 破片模拟弹侵彻钢板的有限元分析[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(3): 78—83.
HOU Hai-liang, ZHU Xi, GU Mei-bang, et al. Finite Element Analysis of Penetrated Steel Plate by Fragment Simulation[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2006, 18(3): 78—83.
- [3] 张伟, 肖新科, 郭子涛, 等. 双层 A3 钢靶对平头杆弹的抗侵彻性能研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 163—169.
ZHANG Wei, XIAO Xin-ke, GUO Zi-tao, et al. Anti-penetration Performance of Double-layer A3 Steel Target on Flat-shot Rod[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(2): 163—169.
- [4] 邓云飞, 孟凡柱, 李剑锋, 等. Q235 钢板对半球形头弹抗侵彻特性[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3): 386—391.
DENG Yun-fei, MENG Fan-zhu, LI Jian-feng, et al. Anti-penetration Characteristics of Q235 Steel Plate against Hemispherical Bullets[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3): 386—391.
- [5] 邓云飞, 张伟, 孟凡柱, 等. Q235 钢板对平头弹抗侵彻特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(3): 54—59.
DENG Yun-fei, ZHANG Wei, MENG Fan-zhu, et al. Characteristics of Anti-penetration of Q235 Steel Plate against Flat-Headed Projectile[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(3): 54—59.
- [6] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Experimental and Numerical Studies on the Behavior of Thin Aluminum Plates Subjected to Impact by Blunt and Hemispherical-Nosed Projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(12): 1921—1944.
- [7] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Effect of Projectile Nose Shape, Impact Velocity and Target Thickness on Deformation Behavior of Aluminum Plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(10): 3411—3439.
- [8] 魏刚. 铝合金板抗杆弹撞击性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WEI Gang. Study on the Impact Resistance of Aluminum Alloy Plate against Bar Impact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [9] 刘文辉, 胡忠举, 刘德顺, 等. 弹丸对铝合金装甲板斜侵彻的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(1): 78—80.
LIU Wen-hui, HU Zhong-ju, LIU De-shun, et al. Numerical Simulation of Oblique Penetration of Projectile into Aluminum Alloy Armor Plate[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(1): 78—80.
- [10] 朱峰, 朱卫华, 王怡舒. 卵形弹头子弹侵彻铝-铁复合靶的数值分析[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(5): 24—27.
ZHU Feng, ZHU Wei-hua, WANG Yi-shu. Numerical Analysis of Oval Bullets Penetrating Aluminum-iron Composite Targets[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(5): 24—27.
- [11] KORNECKI M. Ballistic Experiments and Computed Results for Ti-6Al-4V Projectiles Impacting Ti-6Al-4V Targets[C]// 27th International Symposium on Ballistics Freiburg, 2013.
- [12] 曾刚, 梁增友, 王波, 等. 钢球侵彻 Ti-6Al-4V 靶板的数值分析研究[J]. 机电技术, 2014(12): 41—43.
ZENG Gang, LIANG Zeng-you, WANG Bo, et al. Numerical Analysis of Ball Penetration into Ti-6Al-4V Target[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2014(12): 41—43.
- [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 Shu-tao, ZHONG Tao, CHEN Xiao-jun, et al. Numerical Analysis of Penetration Projectile Penetrating into Titanium Alloy Targets with Different Thicknesses[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(1): 57—61.
- [14] 康永, 柴秀娟. 陶瓷复合装甲材料研究和发展[J]. 现代技术陶瓷, 2011(2): 29—30.

- KANG Yong, CHAI Xiu-juan. Research and Development of Ceramic Composite Armor Materials[J]. *Advanced Ceramics*, 2011(2): 29—30.
- [15] WILKINS M L, CLINE C F, HONODEL C A. Fourth Progress Report of Light Armour Program[R]. UCRL-50694: Lawrence Radiation Laboratory, 1969.
- [16] WILKINS M L, HONODEL C A, LANDINGHAM R L. Fifth Progress Report of Light Armour Program[R]. UCRL-50980: Lawrence Radiation Laboratory, 1971.
- [17] LANDINGHAM R L, CASEY A W. Final Report of the Light Armor Materials Program[R]. UCRL-51269: Lawrence Livermore Laboratory, 1972.
- [18] MEYERS M A. *Dynamic Behavior of Materials*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [19] WOODWARD R L. A Simple One-dimensional Approach to Modelling Ceramic Composite Armour Defeat[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 9(4): 455—474.
- [20] WOODWARD R L, GOOCH W A, DONNELL R G, et al. A Study of Fragmentation in the Ballistic Impact of Ceramics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(5): 605—610.
- [21] HETHERINGTON J G. The Optimization of Two Component Composite Armours[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(3): 409—414.
- [22] YADAV S, RAVICHANDRAN G. Penetration Resistance of Laminated Ceramic/polymer Structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003(8): 557—574.
- [23] GONCALVES D P, MELO F C, KLEIN A N. Analysis and Investigation of Ballistic Impact on Ceramic/metal Composite Armour[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004(4): 307—316.
- [24] MADHU V, RAMANJANEYULUA K, BHAT T, et al. An Experimental Study of Penetration Resistance of Ceramic Armor Subjected to Projectile Impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005(2): 337—350.
- [25] 王文俊. 陶瓷复合装甲防弹机理及防弹性能[J]. *北京理工大学学报*, 1997(2): 147—150.
- WANG Wen-jun. Ballistic Mechanism and Ballistic Performance of Ceramic Composite Armor[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 1997(2): 147—150.
- [26] 仲伟虹, 张佐光, 梁志勇. 轻质陶瓷/复合材料装甲抗弹机理的研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 1998, 21(3): 19—22.
- ZHONG Wei-hong, ZHANG Zuo-guang, LIANG Zhi-yong. Study on the Anti-ballistic Mechanism of Lightweight Ceramic/Composite Armor[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1998, 21(3): 19—22.
- [27] 杜忠华. 动能弹侵彻陶瓷复合装甲机理[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- DU Zhong-hua. Research on the Mechanism of Penetration of Kinetic Energy Projectile into Ceramic Composite Armor[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002.
- [28] 侯海量, 朱锡, 阚于龙, 等. 轻型陶瓷复合装甲结构抗弹性能研究进展[J]. *兵工学报*, 2008, 29(2): 208—216.
- HOU Hai-liang, ZHU Xi, KAN Yu-long, et al. Progress in Research on Ballistic Performance of Lightweight Ceramic Composite Armor[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(2): 208—216.
- [29] 侯海量, 仲强, 朱锡. 轻型陶瓷/金属复合装甲抗弹分析模型研究(英文)[J]. *船舶力学*, 2015, 19(6): 723—735.
- HOU Hai-liang, ZHONG Qiang, ZHU Xi. Study on the Ballistic Analysis Model of Light Ceramic/Metal Composite Armor[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(6): 723—735.
- [30] 熊冉, 高欣宝. 杆式穿甲弹侵彻下陶瓷与均质钢板的等效关系数值分析[J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33(5): 102—104.
- XIONG Ran, GAO Xin-bao. Numerical Analysis of the Equivalent Relationship between Ceramic and Homogeneous Steel Plate under the Penetration of Rod Penetrator[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(5): 102—104.
- [31] 马天宝, 岳恒超, 任会兰, 等. 陶瓷/金属复合靶抗侵彻性能的数值模拟方法研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(4): 228—233.
- MA Tian-bao, YUE Heng-chao, REN Hui-lan, et al. Study on Numerical Simulation Method of Anti-Penetration Performance of Ceramic/Metal Composite Targets[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(4): 228—233.
- [32] 曹贺全, 赵宝荣, 徐龙堂. 装甲防护技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2012.
- CAO He-quan, ZHAO Bao-rong, XU Long-tang. *Armor Protection Technology*[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2012.
- [33] MESSIER D, PATEL P. High Modulus Glass Fibers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, 182(3): 271—277.
- [34] WANG B, CHOU S M. The Behavior of Laminated Composite Plates as Armor[J]. *Journal of Material Processing Technology*, 1997(8): 279—287.
- [35] 杜忠华, 赵国志, 欧阳春, 等. 玻璃纤维层合靶板抗弹性能的研究[J]. *南京理工大学学报*, 2002, 26(5): 465—468.
- DU Zhong-hua, ZHAO Guo-zhi, OUYANG Chun, et al. Study on the Anti-elastic Properties of Glass Fiber Laminated Target[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, 26(5): 465—468.
- [36] 徐豫新, 王树山, 严文康, 等. 纤维增强复合材料三明治板的破片穿甲实验[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(3): 72—78.
- XU Yu-xin, WANG Shu-shan, YAN Wen-kang, et al. Fracture Penetration Test of Fiber Reinforced Compo-

- site Sandwich Panel[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(3): 72—78.
- [37] 韩辉, 李楠. 防弹复合材料及其在武器装备中的应用[J]. *高科技纤维与应用*, 2005, 30(1): 40—43.
HAN Hui, LI Nan. Bulletproof Composite and Its Application in Weapons and Equipment[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2005, 30(1): 40—43.
- [38] MCCONNELL V P. Ballistic Protection Materials a Moving Target[J]. *Reinforced Plastics*, 2006, 50(11): 20—25.
- [39] 胡晓兰, 王东. 用于人体防护装甲的纤维复合材料的研究[J]. *纤维复合材料*, 2000, 40(2): 40—44.
HU Xiao-lan, WANG Dong. Study on Fiber Composites for Human Protective Armor[J]. *Fiber Composites*, 2000, 40(2): 40—44.
- [40] GOWER H L, CRONIN D S, PLUMTREE A. Ballistic Impact Response of Laminated Composite Panels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008(5): 1000—1008.
- [41] 李硕, 王志军, 田非, 等. 芳纶复合材料抗破片模拟弹丸侵彻的一种工程分析方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 35(8): 36—37.
LI Shuo, WANG Zhi-jun, TIAN Fei, et al. Engineering Analysis Method of Aramid Fiber Composites against Fragmentation Projectile Penetration[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 35(8): 36—37.
- [42] 徐豫新, 戴文喜, 王树山, 等. 纤维增强复合材料三明治板破片穿甲数值仿真[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(2): 134—139.
XU Yu-xin, DAI Wen-xi, WANG Shu-shan, et al. Numerical Simulation of Fracture Penetration of Fiber Reinforced Composite Sandwich Plate[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(2): 134—139.
- [43] 李树虎, 陈以蔚, 彭刚, 等. 树脂基复合材料抗弹性能数值模拟[J]. *材料工程*, 2009(2): 113—118.
LI Shu-hu, CHEN Yi-wei, PENG Gang, et al. Numerical Simulation of Ballistic Performance of Resin Matrix Composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009(2): 113—118.
- [44] 赵晓旭, 徐豫新, 田非, 等. 钢/纤维复合板对破片弹速侵彻吸能机制及分析方法[J]. *兵工学报*, 2014(5): 309—314.
ZHAO Xiao-xu, XU Yu-xin, TIAN Fei, et al. Mechanism and Analysis Method of Steel/Fiber Composite Plate Penetrating Energy Absorption Mechanism of Fragment[J]. *Acta Armamentarii*, 2014(5): 309—314.
- [45] 段建军, 杨珍菊, 张世杰, 等. 纤维复合材料在装甲防护上的应用[J]. *纤维复合材料*, 2012, 3(12): 12—16.
DUAN Jian-jun, YANG Zhen-ju, ZHANG Shi-jie, et al. Application of Fiber Composites in Armor Protection[J]. *Fiber Composites*, 2012, 3(12): 12—16.
- [46] ALVES A, NASCIMENT L, SUAREZ J. Influence of Weathering and Gamma Irradiation on the Mechanical and Ballistic Behavior of UHMWPE Composite Armor[J]. *Material Performance*, 2005, 24(1): 104—113.
- [47] GRUJICIC M, ARAKERE G, HE T, et al. A Ballistic Material Model for Cross-plyed Unidirectional Ultra-high Molecular-weight Polyethylene Fiber-reinforced Armor-grade Composite[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008(8): 231—241.
- [48] FAZAL A, FANCEY K S. UHMWPE Fiber-based Composites: Restress-induced Enhancement of Impact Properties[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014(6): 1—6.
- [49] ROSSO S, IANNUCCI L, CURTIS P. On the Ballistic Impact Response of Micro Braid Reinforced Polymer Composites[J]. *Composite Structures*, 2015(7): 70—84.
- [50] 毛亮, 王华, 姜春兰, 等. 钨合金球形破片侵彻陶瓷/DFRP复合靶的弹道极限速度[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(13): 1—5.
MAO Liang, WANG Hua, JIANG Chun-lan, et al. Ballistic Limit Velocity of Tungsten Alloy Spherical Fragment Penetrating Ceramic/DFRP Composite Target[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(13): 1—5.
- [51] 陈晓, 周宏, 王西亭. 叠层靶板的弹道侵彻数值仿真[J]. *兵工学报*, 2014, 35(3): 340—344.
CHEN Xiao, ZHOU Hong, WANG Xi-ting. Numerical Simulation of Ballistic Penetration of Laminated Targets[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(3): 340—344.