

陶瓷/金属复合装甲抗弹约束效应述评

刘桂武^{1,2}, 倪长也¹, 金峰¹, 乔冠军², 卢天健¹

(1. 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 通过对陶瓷/金属复合装甲及其陶瓷约束的介绍,综述了陶瓷复合装甲的抗弹性能表征和 3 种陶瓷约束(轴向、侧向和三维约束)对抗弹性能及机理的影响. 作者认为,采用金属铸造工艺制备金属封装陶瓷复合装甲具有潜在的应用前景,同时应加强对新型陶瓷复合装甲的综合抗弹性能表征、动力学特性、结构优化设计等方面的研究.

关键词: 陶瓷复合装甲;抗弹性能;抗弹机理;约束效应;性能表征

中图分类号: O348 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0007-09

Review of Anti-Ballistic Confinement Effects of Ceramic-Metal Composite Armor

LIU Guiwu^{1,2}, NI Changye¹, JIN Feng¹, QIAO Guanjun², LU Tianjian¹

(1. MOE Key Laboratory of Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The ceramic-metal composite armor and its confinement of ceramic are introduced. The characterization of ballistic performance and the effects of three confinements (axial, lateral and three-dimensional) on ballistic performance and anti-ballistic mechanisms are reviewed. The metal-encased ceramic composite armors fabricated by metal casting are proposed owing to their potential applications. It is pointed out that the studies on characterization of overall ballistic performances, dynamic characteristics and structural design optimization of new ceramic composite armors should be enhanced.

Keywords: ceramic composite armor; ballistic performance; anti-ballistic mechanism; confinement effect; performance characterization

先进陶瓷材料因具有高抗压强度、高硬度、低密度等突出特性而越来越广泛地应用于人体、武装直升机、舰船、坦克、装甲车辆等防弹领域. 将先进陶瓷材料(如 Al_2O_3 、 B_4C 、 SiC 、 TiB_2 和 AlN 等)与合金、钢或 Kevlar 纤维等高强韧性材料复合形成陶瓷复合装甲,有利于满足优良装甲防护材料所必须具备的高强度、高硬度、高韧性、低密度(即“三高一低”)的特性要求. 陶瓷复合装甲的研究和应用始于 1960

年代,并在随后的几十年中得到了迅速发展和广泛应用. 由于陶瓷的抗弹性能属于材料系统问题,而非单一材料问题,因此陶瓷复合装甲的发展一直面临着巨大的挑战^[1]. 目前,高性能和轻量化已成为陶瓷复合装甲的主要发展趋势. 研究表明,陶瓷复合装甲抗弹性能的影响因素包括靶板材料的性能、靶板结构(如各层的厚度、陶瓷约束条件、预应力和界面连接状况等)和弹体材料及其物理参数等^[2],其中靶板

收稿日期: 2010-06-05. 作者简介: 刘桂武(1976—),男,博士后;卢天健(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2011CB610305);国家自然科学基金重点资助项目(51002114,10632060);高等学校学科引智计划资助项目(B06024);教育部博士后科学基金资助项目(20100470089);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100201110035);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xj20100121).

网络出版时间: 2010-12-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20101216.0007.001.html>

结构更具有可设计性,特别是对陶瓷约束(即盖板、侧板或背板等金属板对陶瓷边界的固定限制)进行优化设计,可协同实现陶瓷复合装甲高性能和轻量化的发展目标,很值得深入研究.

1 陶瓷复合装甲的陶瓷约束形式

简单而言,陶瓷/金属复合装甲中的陶瓷约束就是金属板(如盖板、侧板或背板)对陶瓷边界的固定限制.按照陶瓷边界的约束方向与几何维数来划分,陶瓷约束主要包括轴向约束、侧向(或径向)约束和三维约束三大类.按照约束过程中是否存在应力,陶瓷约束又可分为无应力约束和预应力约束 2 类,其中预应力约束包括附加压力约束^[3]和残余应力约束(如在高温胶粘和金属铸造等工艺中形成的残余应力约束^[4-6]),如图 1 所示.陶瓷/金属复合装甲中的陶瓷约束主要采用粘接、机械固定、冶金结合等方式来实现.按照界面结合与陶瓷边界约束情况来分,陶瓷/金属复合装甲有层叠复合装甲(包括传统的双层、陶瓷夹芯和多层陶瓷结构)、陶瓷增强金属匀质复合材料装甲、梯度复合装甲、侧向约束和三维约束

陶瓷复合装甲(包括金属封装陶瓷复合装甲)等基本类型,其中层叠和梯度复合装甲中的陶瓷约束属于轴向约束类型.表 1 归纳了这些基本陶瓷/金属复合装甲的剖面结构、使用材料、制备技术、工艺特点及抗弹性能.目前,陶瓷/金属复合装甲中使用的材料主要包括 Al_2O_3 、 B_4C 、 SiC 、 TiB_2 、 AlN 、 Si_3N_4 和 SiAlon 等陶瓷以及 Al 合金、 Ti 合金和钢等金属材料,其主要性能参数见表 2.

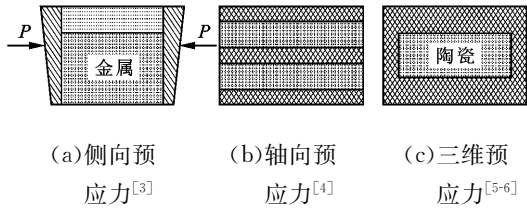


图 1 复合装甲中的预应力约束

2 陶瓷复合装甲的抗弹性能表征方法

随着陶瓷复合装甲结构的发展,其在抗弹试验中的破坏趋于复杂,因而对抗弹性能的评定及表征也应相应变化.陶瓷复合装甲的抗弹性能关键指标

表 1 陶瓷/金属复合装甲的类型、典型剖面结构、使用材料、制备技术、工艺特点及抗弹性能

类型	典型剖面结构	使用材料	制备技术及工艺特点	抗弹性能
匀质复合		SiC_p/Al	粉末冶金法、熔渗法、铸造法等.前者工艺较复杂,价格较高;后两者工艺相对简单,价格较低廉.	抗侵彻能力差,抗冲击和崩落能力优良,综合抗弹性能一般.
层叠		Al_2O_3 、 B_4C 、 SiC 、 TiB_2 、 AlN 、 SiAlon 、 BeO 等; Al 、 Al 合金、 Ti 合金、钢	包括双层、夹芯和多层等结构形式.主要采用粘接技术 ^[4] ,工艺简单,价格低廉.	双层装甲抗侵彻、抗冲击和崩落能力均较差;夹芯和多层结构装甲抗侵彻能力一般,抗冲击和崩落能力较差.综合抗弹性能较差.
梯度		(TiB_2/Ti) 、 $(\text{SiC}/\text{B}_4\text{C}/\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{Al}$	粉末冶金法、熔渗法、铸造法等 ^[7-8] .前者工艺要求高,价格昂贵;后两者工艺相对简单,价格较低廉.	抗侵彻能力一般,抗冲击和崩落能力优良.综合抗弹性能较好.
侧向约束		Al_2O_3 、 SiC 、 AlN 、 TiB_2 和 B_4C 等; 钢	粘接和机械固定相结合,或直接机械固定 ^[9-10] ,工艺简单,价格低廉.	抗侵彻能力较好,抗冲击和崩落能力一般.综合抗弹性能一般.
		Al_2O_3 、 SiC 、 TiB_2 、 B_4C 、 AlN ; 钢	粘接、机械固定工艺 ^[11-12] .工艺简单,价格低廉.	抗侵彻能力较好,抗冲击和崩落能力较好.综合抗弹性能较好.
三维约束		Al_2O_3 、 SiC 、 B_4C 、 TiB_2 、 Si_3N_4 等; Ti 、 Al 合金、非晶合金	金属热喷涂沉积法 ^[13] 、金属铸造法 ^[5-6,14] 、金属熔覆法 ^[15] .前者工艺昂贵;后两者工艺相对简单,价格相对较低廉.	抗侵彻能力优良,抗冲击和崩落能力较好.综合抗弹性能优良.
		Al_2O_3 、 B_4C 、 TiB_2 、 AlN 、 WC ; Ti 、 Al 合金、 Ti 合金、钢	热压或扩散焊 ^[16-17] 、热等静压 ^[18] 、粉末与块体反应烧结 ^[18-19] 等.工艺复杂,对设备要求高,价格昂贵.	抗侵彻能力优良,但对弹着点存在依赖性,抗冲击和崩落能力优良.综合抗弹性能优良.

表 2 陶瓷复合装甲使用材料的主要性能参数

材料	Al ₂ O ₃	B ₄ C	SiC	TiB ₂	AlN	Si ₃ N ₄	Sialon	Al 合金	Ti 合金	钢
密度 ρ /g·cm ⁻³	3.5~3.9 3.6~3.9	2.44~2.51 2.5	2.9~3.2 3.12~3.28	4.5 4.5	3.2~3.5 2.9~3.2	2.7~3.4 3.2	2.93~3.2 3.23~3.26	~2.7	~4.5	~7.8
弹性模量 E /GPa	220~380 340	372~441 400	300~450 408~451	565 570	314 343	150~330 310	300 288	~70	~110	~200
硬度 H /GPa	12~23(HV) 18(HK)	32(HK) 29(HK)	25~27(HV) 25(HK)	25(HV) 26(HK)	12(HV) 12(HK)	15~20(HV) 17(HK)	18~19(HV)	0.05~0.15(HB)	0.2~0.4(HB)	0.15~0.3(HB)
泊松比 ν	0.22~0.24	0.17	0.14~0.21	0.11	0.20	0.20~0.27	0.23	0.31~0.33	0.24~0.30	0.28~0.35

注:陶瓷材料的密度、弹性模量和硬度的第一行数据摘自文献[20-22],第二行数据摘自文献[23];陶瓷材料的泊松比数据主要摘自文献[20];合金材料的数据摘自文献[24];钢的数据主要摘自文献[25].

包括抗侵彻、抗冲击、抗崩落能力,其中抗侵彻能力是陶瓷/金属复合装甲最常用的抗弹性能指标. 目前,确定陶瓷复合装甲抗侵彻性能的试验方法主要有穿深(depth of penetration, DOP)试验、弹道极限试验和反弹道冲击试验等,而国内外更多地采用通过 DOP 试验方法计算得到的质量防护系数 E_m 、差分效益系数 Δe_c 或厚度防护系数等来表征陶瓷或陶瓷靶的抗弹性能. DOP 试验的本质是高密度合金杆式穿甲弹对陶瓷复合装甲的垂直侵彻. 对于带盖板的半无限大(指以 $x=0$ 平面为唯一界面,在 x 的正或负方向上无限延伸)陶瓷复合靶板, E_m 和 Δe_c 分别定义为^[26]

$$E_m = \frac{P_\infty \rho_{st}}{T_{cp} \rho_{st} + T_c \rho_c + P_r \rho_{st}} \tag{1}$$

$$\Delta e_c = \frac{(P_\infty - P_r - T_{cp}) \rho_{st}}{T_c \rho_c} \tag{2}$$

式中: P_∞ 和 P_r 分别为半无限匀质钢参照靶的穿深和半无限陶瓷复合靶中匀质钢背板的残余穿深; ρ_{st} 和 ρ_c 分别为匀质钢和陶瓷的密度; T_{cp} 和 T_c 分别为盖板和陶瓷板的厚度. 由于式(1)和式(2)中各参量未对靶板的侧向边界条件进行限制,故对各种外形(如矩形或圆柱形)的陶瓷复合靶均可适用,但是二式只考虑了盖板的作用,而未考虑其侧向约束的量化作用. 当陶瓷复合靶板不带盖板(即 $T_{cp}=0$)时, E_m 和 Δe_c 的表达式分别转化为^[27-28]

$$E_m = \frac{P_\infty \rho_{st}}{T_c \rho_c + P_r \rho_{st}} \tag{3}$$

$$\Delta e_c = \frac{(P_\infty - P_r) \rho_{st}}{T_c \rho_c} \tag{4}$$

当陶瓷厚度增加到一定程度时,残余穿深 $P_r=0$,此时式(3)的 E_m 转化为式(4)的 Δe_c .

张自强等^[29]较早地对特种装甲(泛指匀质装甲以外的所有装甲,包括陶瓷复合装甲)的抗弹性能评定进行了归纳,采用厚度防护系数 N_h 、质量防护系数 N_m 、成本效益 N_c 和综合防护性能 E 来表征,其中 N_h 和 N_m 的表达式分别为

$$N_h = \frac{P_\infty}{T_t} \tag{5}$$

或
$$N_h = \frac{(P_\infty - P_{ap})}{T_t} \tag{6}$$

$$N_m = N_h \frac{\rho_{st}}{\rho_a} = \frac{P_\infty \rho_{st}}{T_t \rho_a} \tag{7}$$

或
$$N_m = N_h \frac{\rho_{st}}{\rho_a} = \frac{(P_\infty - P_a) \rho_{st}}{T_t \rho_a} \tag{8}$$

以上各式中: T_t 和 P_{ap} 为特种装甲的穿深和后效钢板中的残余穿深; ρ_a 为特种装甲的平均密度. 式(5)和式(7)、式(6)和式(8)分别对应特种装甲未被穿透和被穿透时的情形. 需要指出的是,式(5)~式(8)只是简单地将陶瓷复合装甲等特殊装甲视为一个整体,而未考虑其中各单元和具体结构的作用.

基于相关试验结果和杆式弹侵彻过程的力学分析,张连生等^[30]提出了陶瓷复合靶差分效益系数 Δe_c 的理论表达式

$$\Delta e_c = \left[\frac{\rho_{st}}{\rho_c} \right] \left[\frac{v_{st}}{v_c} \right] \left[\frac{v_p - v_c}{v_p - v_{st}} \right] \tag{9}$$

式中: v_p 为杆式弹在侵彻前的速度; v_{st} 和 v_c 分别为杆式弹在匀质钢靶和陶瓷靶中的侵彻速度. 采用不同的侵彻理论模型和方法(如描述杆式弹侵彻过程的 A-T 理论^[31]和计算靶板抗侵彻阻力 R_t 的准静态球形空腔膨胀理论及方法^[32-33])可计算出 v_{st} 和 v_c ,从而可根据式(9)计算出 Δe_c . 由于式(9)中 v_{st} 和 v_c 是通过采用分别侵彻匀质钢靶或陶瓷靶(即分离陶

瓷/金属复合靶)的相关理论计算得到的,这与实际侵彻陶瓷/金属复合靶的过程有所不同(如存在弹体损伤和界面问题),同时也未考虑侧向约束对其侵彻过程的影响,因此存在一定的局限性和不准确性,但可采用式(9)进行近似估计。

基于式(4)和黄良钊等^[10]对侧向约束的圆柱形陶瓷/金属复合靶的静力学分析结果,麻震宇等^[34]在考察侧向约束的圆柱形陶瓷/金属复合靶的抗弹性能时,将质量防护系数 N_m 修正为

$$N_m = \frac{\rho_{st} R^2 (P_{\infty} - P_r)}{[\rho_c r^2 + \rho_l (R^2 - r^2)] T_c} \quad (10)$$

式中: ρ_l 为侧向约束板(与背板同材)的密度; R 和 r 分别为钢背板和陶瓷板的半径。式(10)考虑了侧向约束板的密度和厚度,且当 $R=r$, 即无侧向约束板时,式(10)转化为式(4)。该修正公式的研究对象仅为侧向约束的圆柱形靶,它既不能用于常见的矩形靶,且由于未考虑轴向约束(即盖板的作用),所以也不能用于三维约束复合靶。

李永池等^[35-36]在考察盖板和钢套筒三维约束 Al_2O_3 陶瓷靶的抗弹和抗射流侵彻试验时,将厚度防护系数 N_h 描述为

$$N_h = \frac{P_{\infty} - P_r - T_{cp}}{T_c} \quad (11)$$

但是,上式仅简单考虑了穿深和板厚的影响。此外,人们也经常直接采用弹道极限速度 v_{50} 来表征陶瓷复合靶的抗弹性能。

综上所述,以上各式或者只考虑了盖板约束的影响,或者只针对圆柱形靶考虑了侧向约束的影响,但是却未能提出综合考虑三维约束(轴向和侧向同时约束)对复合靶(特别是矩形靶)抗侵彻性能的量化表征方法。此外,目前绝大多数的表征方法都是针对复合装甲的抗侵彻性能来进行的,而对于其抗冲击、抗崩落,特别是抗多发弹能力的表征却很少,并且由于抗侵彻性能本质上是针对杆式穿甲弹的垂直侵彻的,所以也需要量化其与倾角侵彻性能之间的变换关系。因此,对于近年来发展起来的新型陶瓷复合装甲(如具有优良抗崩落或抗多发弹能力的梯度和金属封装陶瓷复合装甲),迫切需要对其综合抗弹性能进行更合理的试验或理论表征。

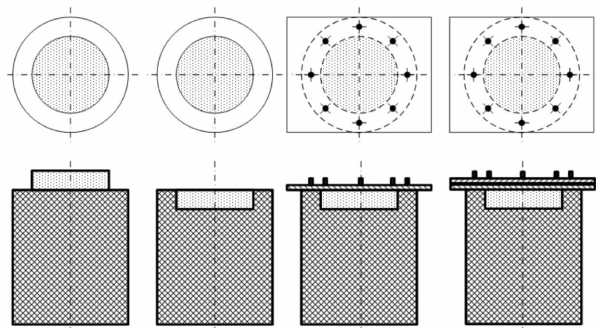
3 陶瓷复合装甲的约束效应

目前,对于陶瓷复合装甲抗弹性能与抗弹机理的约束效应(包括轴向、侧向和三维约束效应)主要采用试验研究,而对于其数值模拟和结构优化设计

等方面的研究比较有限,特别是针对陶瓷复合装甲的三维约束的优化设计还未见报道,且不管是研究对象(如陶瓷种类和靶板结构)、研究角度还是研究深度,国内均明显滞后于国外。

3.1 试验研究

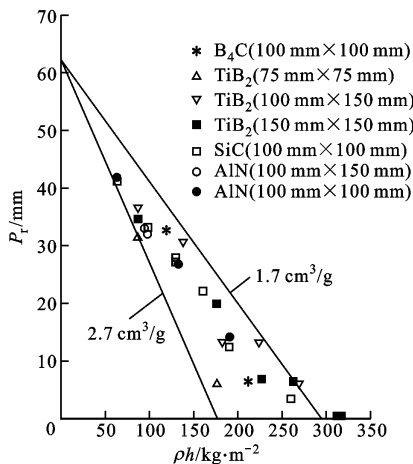
对于陶瓷复合装甲抗弹的轴向约束效应,主要考察的是盖板对其抗弹性能的影响,且一般认为盖板对复合装甲的抗弹性能存在有利影响,如通过盖板吸收弹丸的部分能量和抑制陶瓷碎粒的反向流动来提高复合靶的抗侵彻性能^[37]。然而,Anderson等^[9,38]通过改变盖板的类型和厚度(如图2所示)来考察轴向约束对 Al_2O_3 陶瓷抗弹性能的影响时,发现陶瓷抗弹性能的约束效应与冲击速度有关:低速冲击时,陶瓷性能对约束变化很敏感,冲击速度越高,陶瓷性能与冲击速度的关联程度越低。



(a) 无约束 (b) 径向约束 (c) 单层盖板 (d) 双层盖板

图2 靶构造示意图^[9]

对于陶瓷复合装甲抗弹性能的侧向约束效应,国内外进行了较多的研究工作,而对于抗弹机理的侧向约束效应的研究却比较有限。就抗弹性能研究而言,国内主要是通过对比研究了有、无侧向约束条件下 Al_2O_3 陶瓷复合靶板的抗弹或抗射流侵彻性能,结果均发现其性能得到了不同程度的提高,并且或认为侧向约束可保持碎靶的体积完整性和不扩散性,有利于显示各种耗能机制^[10];或认为侧向约束力会使陶瓷碎粒密贴在弹丸周围,使陶瓷碎粒在沿弹丸反向流动时有利于对弹丸的磨蚀作用^[39];或认为约束条件下射流侵彻陶瓷过程中产生的回爆干扰了后续射流侵彻^[40]。国外的研究则考察了陶瓷板尺寸对侧面约束效应的影响,其中:Anderson等^[41]认为陶瓷厚度对侧面约束效应无影响;Rosenberg等^[42]认为弹道效率(残余穿深与面密度之比)随陶瓷厚度的增加而下降是由于陶瓷板相对小的侧向尺寸所导致的侧向松散效应引起的(如图3所示);

图3 穿深试验结果^[42]

Weber 等^[43]通过对多层 AlN 靶板抗弹性能的试验和计算,指出陶瓷的抗弹性能随靶板横向尺寸的减小而下降,且认为是由于横向自约束的减小导致陶瓷强度下降而引起的。另一方面,国外主要考察了径向约束对抗弹性能的影响,认为这种影响很小,特别是在高冲击速度的条件下^[44-45]。就抗弹机理研究而言, Sherman 等^[3,46]分别考察了不同侧向约束(无约束、无压力约束、附加压力约束,见图 1a)条件下有限厚实体背板或中空砧板支撑的 Al_2O_3 复合靶板的损伤和失效机制,认为侧向无压力约束可使陶瓷靶板保持完整,并可降低背板的不可逆偏转,但陶瓷径向裂纹数量基本不变,而侧向压力约束则可大幅度减少陶瓷损伤和径向裂纹,且侧向约束只对静态损伤有一定影响,对薄陶瓷板的影响很小,对动态损伤无影响。Doyoyo 等^[47]则采用 3 种不同材料(不锈钢、铝和聚碳酸酯)无压力径向约束硼硅酸盐玻璃,研究了约束阻抗对失效动力学的作用,指出该玻璃的粉碎门槛应力依赖于约束阻抗,穿深和碎瓷直径随约束阻抗的增加而增大,随弹体直径减小而减小,但钢约束时的穿深值反而比铝约束时的更大。

对于陶瓷复合装甲抗弹性能的三维约束效应,国内的研究者认为,三维约束有利于提高抗弹性能,其中: Bao 等^[5]研究发现,压缩预应力约束可大大增强靶板的抗冲击和抗穿透性,并认为三维预应力提高陶瓷抗冲击性能比二维预应力效果好;王和平等^[48]认为,合理有效的三维约束不仅能提高陶瓷复合装甲的抗弹性能,还能使其具备抗多发弹能力。国外的研究者则主要考察了三维约束对陶瓷失效行为的影响,例如: O'Donnell 等^[49]通过对比三维约束和未约束的 4 个不同等级 (Al_2O_3) 的质量分数分别

为 85%、90%、95% 和 99.5%) 的 Al_2O_3 陶瓷的碎裂行为,发现约束使靶板碎片变得粗大; Shockey 等^[11]认为,有效的三维约束使得粉碎的陶瓷 (Al_2O_3 、SiC、 B_4C 或 TiB_2) 块既不能向侧面飞溅,也不能穿透背板,即陶瓷碎片只能沿弹体侵彻形成的狭小通道反向运动,从而增强了对弹体的磨蚀作用,有利于提高装甲板的抗弹性能。

3.2 数值模拟

目前对于陶瓷抗弹约束效应的数值模拟研究,绝大多数是借助陶瓷材料的 Johnson-Holmquist 本构模型 (JH-2 模型)^[50] 或 Johnson-Cook 材料模型^[51] 结合 LS-DYNA 有限元分析软件实现的。国内的数值模拟研究结果普遍表明,各种约束可提高陶瓷复合靶板的抗弹性能^[12,34,52-53]。国外的数值模拟研究更多地考虑冲击速度对约束效应的影响,其中: Chocron 等^[54]在考察冲击 SiC 圆柱靶时陶瓷穿透失效动力学效应的基础上,采用理想计算模型和专门用于偏心入射冲击的 CTH 软件^[55],数值模拟了侧向约束与冲击速度的关系,发现随冲击速度增大,侧向约束效应下降,当冲击速度高于 3.5 km/s 时,偏心入射的试验结果位于中心入射分散数据的范围内; Westerling 等^[56]采用试验和数值模拟(用 JH-2 模型和 AUTODYN 程序)方法,对比研究了钨长杆弹冲击未约束和准三维钢约束(特指金属盖板上设有便于入射的孔的情况)的圆柱形 Al_2O_3 陶瓷靶的约束效应,发现高速 (2.5 km/s) 冲击时的约束效应小于低速 (1.5 km/s) 冲击时的约束效应,低速时的模拟结果与试验结果吻合良好,但对高速时的约束效应有所高估。

3.3 优化设计

目前,对于陶瓷复合装甲的优化设计主要是针对传统的双层层叠复合装甲进行的^[57-61],基本方法为:先根据冲击过程中的能量守恒、动量守恒和质量守恒以及材料的本构方程,建立弹道极限速度、侵彻深度或防护系数等参量表达式,然后加上特定的约束条件(如几何条件、边界条件和初始条件),即建立包含各参量计算式在内的多目标优化函数表达式,最后通过分析讨论,数值模拟出优化目标(如弹道极限速度、面密度等)与优化参数之间的关系。例如,麻震宇等^[34]基于长杆弹垂直侵彻侧向约束陶瓷复合靶板的数值模拟,对侧向约束钢板的厚度进行了优化,结果表明:侧向约束板存在最佳厚度值,且当弹体入射速度为 0.8~1.2 km/s 时,侧向约束板的最佳厚度约为 10 mm;当弹体入射速度为 0.6 km/s

和 1.4 km/s 时,侧向约束板最佳厚度分别为 6 mm 和 14 mm. 井玉安等^[62]为优化设计钢夹芯 Al_2O_3 陶瓷复合装甲板,结合薄板冲塞的极限速度方程与 Florence 模型^[63],建立了钢夹芯 Al_2O_3 陶瓷复合装甲板的抗弹极限速度预测模型,其基本思想是:利用钝头弹垂直碰撞薄板冲塞的剩余速度方程,计算出面板在一定初始速度条件下的剩余速度,再将此剩余速度作为极限穿透速度代入弹体垂直撞击陶瓷复合靶板的计算公式——Florence 模型,由此计算出的初始速度即可看作是钢/陶瓷/钢复合靶板的极限穿透速度. 计算得到的复合装甲板的抗弹极限速度 v_{50} 与面密度 A 及厚度比 k 之间的函数关系为

$$v_{50} = \left\{ v_{cf}^2 + \left(1 + \frac{T_{cp}}{l} \right)^2 \frac{A - \rho T_{cp}}{k\rho_c + \rho} \frac{\varepsilon_r \sigma_{sb}}{0.91m_p} \cdot \left[\pi a^2 + \frac{\pi^2 a^4 (A - \rho T_{cp})}{m_p} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (12)$$

式中: v_{cf} 为钝头弹垂直碰撞薄钢板冲塞的极限速度; l 为弹体长度; A 为复合装甲板的面密度, $A = \rho_{cp} T_{cp} + \rho_c T_c + \rho_{bp} T_{bp}$, 其中 ρ_{cp} 为钢面板密度, ρ_{bp} 和 T_{bp} 分别为背板的密度和厚度; ρ 为假设弹体、钢面板和钢背板密度相等时的密度, 即 $\rho = \rho_p = \rho_{cp} = \rho_{bp}$; k 为陶瓷芯板与背板的厚度比, 即 $k = T_c / T_{bp}$; ε_r 为背板材料的破坏应变; σ_{sb} 为背板材料的屈服强度; m_p 为弹体的质量; a 为陶瓷锥的底圆半径. 他们根据该模型分析了不同的面板、背板及陶瓷厚度组合对钢夹芯 Al_2O_3 陶瓷装甲板抗弹极限速度的影响, 认为当面密度相同时, 陶瓷夹芯可提高复合装甲板的抗弹极限速度. 然而, 验证结果表明, 该模型只有在钢面板厚度小于 1 mm 时才具有较好的有效性(相对误差小于 15%), 而这一有效性条件 ($T_{cp} < 1$ mm) 与实际情况不符, 导致这一结果的根本原因在于初始使用的钝头弹垂直碰撞薄板冲塞的剩余速度方程是针对薄板的.

综上所述, 对陶瓷金属复合装甲中的陶瓷进行有效约束, 有利于盖板吸收弹丸的动能, 改变应力波在边界上的反射或折射特性, 抑制陶瓷碎片和粉末的横向或反冲击方向的流动, 增强对弹体的磨损作用, 从而可不同程度地提高复合装甲的抗弹性能, 且抗弹约束效应与金属板和陶瓷板的尺寸、界面特征、预应力、冲击速度、金属或陶瓷材料性能(宏、微观结构, 冲击特征和材料特性)等密切相关. 针对目前陶瓷复合装甲抗弹约束效应的研究现状, 需要加强新型陶瓷复合装甲的抗弹性能、机理以及约束效应的数值模拟研究, 特别是考察陶瓷约束(如三维预应力

约束)对复合装甲的动力学特性(如弹靶系统的失效行为和应力波界面传播特性)的影响, 以及对各种新型陶瓷复合装甲进行结构优化设计.

4 金属封装陶瓷复合装甲

金属封装陶瓷复合装甲是近几年发展起来的一类具有陶瓷三维约束和界面冶金结合特征的新型陶瓷/金属复合装甲, 具有优良的综合抗弹性能(见表 1), 尤其是具有抗多发弹能力, 在国际上受到了极大的关注, 在国内也正受到相关单位的重视^[64-65]. 金属封装陶瓷复合装甲综合了前述轴向、侧向和三维约束复合装甲所显示的所有正约束效应, 此外, 由于其陶瓷/金属界面为冶金结合界面(界面层为陶瓷与金属的反应过渡层), 因此兼具有一定的梯度过渡效果, 从而减轻了弹丸冲击过程中应力冲击波在层间界面上产生的反射拉伸波和横向剪切波等对复合装甲和陶瓷的破坏. 目前, 金属封装陶瓷复合装甲(如表 1 中三维约束类型的后 2 种结构)的制备主要采用热压或扩散焊、热等静压、粉末与块体反应烧结、金属热喷涂沉积和金属铸造等技术, 其中金属铸造技术与其他几种技术相比具有工艺简单、制造成本低等优点. 另外, 由于陶瓷比一般金属材料的热膨胀系数小, 采用金属铸造工艺制备金属封装陶瓷复合装甲时, 在铸造冷却过程中会导致芯部陶瓷形成压缩预应力约束的效果, 从而更能显示出抗弹性能的正约束效应. 基于此, 作者所在的团队近来采用宏观有序多孔道陶瓷的金属铸造复合技术, 开发了具有三明治互穿结构的金属封装陶瓷复合装甲^[66], 其基本思路是先将陶瓷成型加工为具有贯穿厚度方向的宏观有序多孔道(直孔或斜孔)的陶瓷板, 然后将陶瓷板固定于铸型内, 通过多种铸造技术浇注金属熔体, 最后形成具有三明治互穿结构的新型金属封装陶瓷复合装甲. 需要指出的是, 这种三明治互穿型复合装甲和陶瓷模块化的金属封装陶瓷复合装甲^[19](见表 1 末行图)的抗侵彻性能均对弹着点存在一定的依赖性, 如在陶瓷板孔道处或陶瓷块之间的金属肋处, 由于没有陶瓷的存在, 其抗侵彻性能不足. 因此, 有必要开发具有双层或多层互穿结构的新型金属封装陶瓷复合装甲(陶瓷板层与层的孔道之间相互错位), 并对其结构进行设计和优化, 这样既可以保持优良的抗冲击和抗崩落能力, 又可以显著降低抗侵彻性能对弹着点的依赖性.

目前, 国内外针对金属封装陶瓷复合装甲的研究主要还停留在制备工艺及通过较为简单的数值模

拟来考察其抗弹性能的层面^[52]. 采用金属铸造工艺,通过对金属封装陶瓷复合装甲的结构设计、配置优化及制备工艺进行调控,并对其抗弹性能和抗弹机理进行系统考察,将有助于实现现代陶瓷复合装甲“高性能、轻型化、低成本”的发展目标,具有潜在的应用前景.

5 结束语

(1)针对目前复合装甲抗弹性能表征的单一性和局限性,以及各种新型陶瓷复合装甲结构的出现,需要加强对其综合抗弹性能(如抗侵彻、抗冲击、抗崩落和抗多发弹能力)的表征,如采用综合考虑盖板和侧向板约束作用的质量防护系数或差分效益系数来表征三维约束陶瓷复合装甲的抗侵彻性能,同时采用一定的弹道速度(如 $50\%v_{50}$)冲击一定面积的陶瓷复合靶,通过记录复合靶完全失效或破坏的打击次数等来表征其抗多发弹能力.

(2)对陶瓷/金属复合装甲中的陶瓷进行有效约束,从而可不同程度地提高其抗弹性能,且抗弹约束效应与靶板的宏微观结构、冲击特征和材料特性等密切相关. 针对目前陶瓷复合装甲抗弹约束效应的研究现状,需要加强对新型陶瓷复合装甲的抗弹性能、抗弹机理和约束效应的数值模拟研究,特别是考察陶瓷约束(如三维预应力约束)对复合装甲的动力学特性(如弹靶系统的失效行为和应力波界面传播特性)的影响,以及对各种新型陶瓷复合装甲进行结构优化设计.

(3)金属封装陶瓷复合装甲因具有有效的三维约束、良好的界面冶金结合和界面梯度效果,使得其综合抗弹性能优良,尤其是具有抗多发弹能力. 采用金属铸造等工艺,通过宏微观结构设计及调控对金属封装陶瓷复合装甲的结构与性能进行协同优化,有望实现“高性能、轻型化、低成本”的新型陶瓷复合装甲的发展要求,具有潜在的应用前景.

参考文献:

- [1] RAPACKI E J, HAUVER G E, NETHERWOOD P H, et al. Ceramics for armours: a material system perspective [C]//Proceedings of the 7th Annual TARDEC Ground Vehicle Survivability Symposium. Monterey, California, USA: Naval Postgraduate School, 1996:139-147.
- [2] 侯海量,朱锡,阚于龙. 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.
- [3] HOU Hailiang, ZHU Xi, KAN Yulong. The advance of ballistic performance of light ceramic composite armour under the impact of projectile [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(2):208-216.
- [4] SHERMAN D, BEN-SHUSHAN T. Quasi-static impact damage in confined ceramic tiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(4):245-265.
- [5] HAN C, SUN C T. A study of pre-stress effect on static and dynamic contact failure of brittle materials [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 24(6/7):597-611.
- [6] BAO Yiwang, SU Shengbiao, YANG Jianjun, et al. Pre-stressed ceramics and improvement of impact resistance [J]. Materials Letters, 2002, 57(2):518-524.
- [7] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. Modeling pre-stressed ceramic and its effect on ballistic performance [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(2):113-127.
- [8] RODRIGUEZ-CASTRO R, WETHERHOLD R C, KELESTEMUR M H. Microstructure and mechanical behaviour of functionally graded Al A359/SiCp composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 323(1/2):445-456.
- [9] GOOCH W A, CHEN B H C, BURKINS M S, et al. Development and ballistic testing of a functionally gradient ceramic/metal applique [J]. Materials Science Forum, 1999, 308/309/310/311:614-621.
- [10] ANDERSON C E, ROYAL-TIMMONS S A. Ballistic performance of confined 99.5%-Al₂O₃ ceramic tiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(8):703-713.
- [11] 黄良钊,张巨先. 弹丸对陶瓷靶侵彻试验中的约束效应研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 1999, 22(4):13-17.
- [12] HUANG Liangzhao, ZHANG Juxian. Study of binding effect in test on impacting and biting ceramics target with ball [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1999, 22(4):13-17.
- [13] SHOCKEY D A, MARCHAND A H, SKAGGS S R, et al. Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods [J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 9(3):263-275.
- [14] 晏麓晖,曾首义,蒋志刚,等. 陶瓷厚度与约束对陶瓷复合靶抗弹性能的影响 [J]. 弹道学报, 2009, 21(3):15-18, 22.
- [15] YAN Luhui, ZENG Shouyi, JIANG Zhigang, et al. Effects of ceramic thickness and confinement on performance of ceramic composite targets [J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(3):15-18, 22.
- [16] CHU H S, LILLO T H, MCHUGH K M. Coated ar-

- mor system and process for making the same; US, 20060105183 [P]. 2006-05-18.
- [14] COLLIER S, PEKER A. Encapsulated ceramic armor; WO, 2003078158-A1 [P]. 2003-09-25.
- [15] LEIGHTON K, GARNIER J, ALESHIRE E. Metal-ceramic materials; US, 20060141237-A1 [P]. 2006-06-29.
- [16] DIPIETRO S. Method for producing armor through metallic encapsulation of a ceramic core; WO, 2009045584 [P]. 2009-04-09.
- [17] RICHARD P, DANIEL A. Ceramic armor and method or making by encapsulation including use of a stiffening plate; US, 20060137517 [P]. 2006-06-29.
- [18] ABKOWITZ S, ROWELL D M, HEUSSI H L, et al. Impact resistant clad composite armor and method for forming such armor; US, 4987033 [P]. 1991-01-22.
- [19] KELSEY V P. Method and system for reaction bonded ceramic armor formed in situ in a metal containment; WO, 2006083319 [P]. 2006-08-10.
- [20] 江东亮, 李龙土, 欧阳世翥, 等. 无机非金属材料手册: 上 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 30-240.
- [21] 金志浩, 高积强, 乔冠军. 工程陶瓷材料 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 130-170.
- [22] MARTIENSSEN W, WARLIMONT H. Handbook of condensed matter and materials data: part 3 classes of materials, ceramics [M]. Berlin, Germany: Springer, 2005: 431-476.
- [23] 胡玉龙, 蒋凡. 装甲陶瓷的发展现状与趋势 [J]. 兵器材料科学与工程, 1996, 19(5): 37-42.
- HU Yulong, JIANG Fan. Development and current status of armor ceramics [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1996, 19(5): 37-42.
- [24] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 中国材料工程大典: 第四卷 有色金属工程 上 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 52-161, 499-694.
- [25] 孙玉福. 钢铁材料速查手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 53-58.
- [26] YAZIV D, ROSENBERG G, PARTOM Y. Differential ballistic efficiency of applique armor [C] // Proceedings of 9th International Symposium on Ballistics; Vol. 2. Shrivenahm, UK: Royal Military College of Science, 1986: 315-319.
- [27] BLESS S J, ROSENBERG Z, YOO B. Hypervelocity penetration of ceramic [J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 5(1/2/3/4): 165-171.
- [28] HOHLER V, STILP A J, WEBER K. Hypervelocity penetration of tungsten sinter-alloy rods into aluminum [J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 17(1/2/3): 409-418.
- [29] 张自强, 赵宝荣, 张锐生, 等. 装甲防护技术基础 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000: 44-47.
- [30] 张连生, 黄风雷. 抗弹陶瓷材料抗弹性能的理论表征 [J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(7): 651-654.
- ZHANG Liansheng, HUANG Fenglei. Theoretical characterization of ballistic performance of armor ceramics [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(7): 651-654.
- [31] TATE A. A theory for the deceleration of long rods after impacts [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1967, 15: 387-399.
- [32] HILL R. The mathematical theory of plasticity [M]. London, UK: Oxford University Press, 1950.
- [33] SATAPATHY S, BLESS S. Calculation of penetration resistance of brittle materials using spherical cavity expansion analysis [J]. Mechanics of Materials, 1996, 23: 323-330.
- [34] 麻震宇, 曾首义, 蒋志刚. 陶瓷复合靶板抗长杆弹侵彻的数值模拟分析 [J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(7): 727-731.
- MA Zhenyu, ZENG Shouyi, JIANG Zhigang. Numerical analysis of the ballistic performance of confined ceramic composite targets against long rod penetrators [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(7): 727-731.
- [35] 孙宇新, 李永池, 于少娟, 等. 长杆弹侵彻约束 A95 陶瓷靶的实验研究 [J]. 弹道学报, 2005, 17(2): 38-41, 48.
- SUN Yuxin, LI Yongchi, YU Shaojuan, et al. An experimental study on the penetration confined A95 ceramic targets [J]. Journal of Ballistics, 2005, 17(2): 38-41, 48.
- [36] 于少娟, 李永池, 张先锋, 等. 约束陶瓷靶抗射流侵彻实验研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(11): 1299-1303.
- YU Shaojuan, LI Yongchi, ZHANG Xianfeng, et al. An experimental study on anti-penetration process of confined AD95 ceramic targets to shaped charge jets [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(11): 1299-1303.
- [37] 李平, 李大红, 宁建国, 等. Al_2O_3 陶瓷复合靶抗长杆弹侵彻性能和机理实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4): 289-294.
- LI Ping, LI Dahong, NING Jianguo. Experimental study on the ballistic performance and mechanism of confined ceramic targets against long rod penetrators [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 289-294.

- [38] ANDERSON C E, WALK J D, LANKFORD J. Investigations of the ballistic response of brittle materials, SwRI Report 06-5117/002 [R]. Research Triangle Park, NC, USA: US Army Research Office, 1995:1-96.
- [39] 段卓平, 朱艳丽, 张连生. 爆炸成型弹丸对 Al_2O_3 装甲陶瓷材料的侵彻实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(6):505-509.
- DUAN Zhuoping, ZHU Yanli, ZHANG Liansheng. DOP experimental study on EFP penetrating Al_2O_3 armor ceramic [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6):505-509.
- [40] 张先锋, 李永池. 约束及增韧对氧化铝陶瓷抗射流侵彻性能的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2):149-154.
- ZHANG Xianfeng, LI Yongchi. Constraining and toughening effects on anti-penetration properties of alumina ceramic targets to shaped charge jets [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2):149-154.
- [41] ANDERSON C E, MORRIS B L. The ballistic performance of confined Al_2O_3 ceramic tiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(2):167-187.
- [42] ROSENBERG Z, DEKEL E, HOHLER V, et al. Penetration of tungsten-alloy rods into composite ceramic targets: experiments and 2-D simulations [J]. Shock Compression of Condensed Matter, 1997, 42:917-920.
- [43] WEBER K, HOLMQUIST T J, TEMPLETON D W. The response of layered aluminum nitride targets subjected to hypervelocity impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26(1):831-841.
- [44] WESTERLING L, LUNDBERG P, LUNDBERG B. Tungsten long-rod penetration into confined cylinders of boron carbide at and above ordnance velocities [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(7):703-714.
- [45] LYNCH N J, BLESS S J, CULLIS I G, et al. The influence of confinement on the penetration of ceramic targets by KE projectiles at 1.8 and 2.6 km/s [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1):390-401.
- [46] SHERMAN D. Impact failure mechanisms in alumina tiles on finite thickness support and the effect of confinement [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(3):313-318.
- [47] DOYOYO M. Experiments on the penetration of thin long-rod projectiles into thick long-cylindrical borosilicate targets under pressure-free polycarbonate, aluminum and steel confinements [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(20):5455-5475.
- [48] 王和平, 王智慧. 陶瓷约束效应对复合装甲抗弹性能的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(2):61-64.
- WANG Heping, WANG Zhihui. Influence of ceramic confined effect on ballistic performance of composite armor [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(2):61-64.
- [49] O'DONNELL R G, WOODWARD R L. Fragmentation of alumina in ballistic impact as a function of grade and confinement [C]//Proceedings of the 12th International Symposium on Ballistics; Vol. 1. San Antonio, Texas, USA: Southwest Research Institute, 1990:410-418.
- [50] HOLMQUIST T J, TEMPLETON D W, BISHNOI K D. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(3):211-231.
- [51] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual; version 970 [M]. Livermore, CA, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [52] 王曙光, 朱建生. 金属封装陶瓷复合装甲抗弹性能研究 [J]. 弹道学报, 2009, 21(4):68-71.
- WANG Shuguang, ZHU Jiansheng. Study on antibullet performance of metal-ceramic composite armor [J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(4):68-71.
- [53] LI Jin-zhu, HUANG Feng-lei, ZHANG Lian-sheng. Numerical simulations of tungsten alloy rods penetration into alumina ceramic/armor steel composite target [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2008, 17(3):253-258.
- [54] CHOCRON I S, ANDERSON C E, BEHNER T, et al. Lateral confinement effects in long-rod penetration of ceramics at hypervelocity [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1):169-179.
- [55] MCGLAUN J M, THOMPSON S L, ELRICK M G. CTH: a three-dimensional shock wave physics code [J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 10(1/2/3/4):351-360.
- [56] WESTERLING L, LUNDBERG P. The influence of confinement on the protective capability of ceramic armour at two different velocities [C]//Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistics; Vol. 1. Jerusalem, Israel: Israel Institute of Technology, 1995:283-290.

- [57] 杜忠华, 赵国志, 王晓鸣, 等. 双层陶瓷复合靶板抗弹性的研究 [J]. 航空学报, 2002, 23(2):147-150.
DU Zhonghua, ZHAO Guozhi, WANG Xiaoming, et al. Study of double-layer ceramic complex armor for defensible performance [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2):147-150.
- [58] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. Optimization of two-component composite armor against ballistic impact [J]. Composite Structures, 2005, 69(1): 89-94.
- [59] 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.
- [60] SHI J, GROW D. Effect of double constraints on the optimization of two-component armor systems [J]. Composite Structures, 2007, 79(3):445-453.
- [61] KURTARAN H, BUYUK M, ESKANDARIAN A. Design automation of a laminated armor for best impact performance using approximate optimization method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 29 (1):397-406.
- [62] 井玉安, 果世驹, 韩静涛. 钢/ Al_2O_3 陶瓷/钢轻型复合装甲板抗弹性能 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29 (4):402-407.
JING Yuan, GUO Shiju, HAN Jingtao. Ballistic property of steel/ceramic/steel composite armor [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(4):402-407.
- [63] FLORENCE A L. Interaction of projectiles and composites armour: part II [R]. California, USA: Stanford Research Institute, 1969.
- [64] 韩辉, 李楠. 金属封装陶瓷复合装甲研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(4):79-82.
HAN Hui, LI Nan. Research progress in metal encapsulating ceramic composite armors [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(4):79-82.
- [65] 蒋志刚, 曾首义, 申志强. 轻型陶瓷复合装甲结构研究进展[J]. 兵工学报, 2010, 31(5):603-610.
JIANG Zhigang, ZENG Shouyi, SHEN Zhiqiang. Research progress on lightweight ceramic composite armor structure [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(5): 603-610.
- [66] 刘桂武, 乔冠军, 王红洁, 等. 一种金属/陶瓷复合材料的装甲及其制备方法: 中国, 200710018553 [P]. 2008-04-09.

(编辑 葛赵青)