

# 拼接式陶瓷复合装甲防护性能数值模拟

陈智勇<sup>1</sup>, 徐颖强<sup>2</sup>, 程广伟<sup>1</sup>, 李妙玲<sup>1</sup>, 刘建寿<sup>1</sup>

(1. 洛阳理工学院机械工程学院, 河南 洛阳 471023)

(2. 西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 陶瓷复合装甲是防弹车辆的热门防弹方案, 根据轻型防弹车辆防护要求, 进行拼接式陶瓷复合装甲结构设计, 通过有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟陶瓷片形状和尺寸对复合装甲防弹性能影响, 并进行打靶试验验证, 结果表明所提出的数值模拟计算方法能较好模拟子弹对拼接式陶瓷复合装甲的侵彻过程, 相同形状的陶瓷片, 面积较大陶瓷片的防弹性能要优于面积较小陶瓷片的防弹性能; 正六边形陶瓷片的防弹性能要优于相同面积的正四边形陶瓷片的防弹性能。

**关键词:** 复合装甲; 陶瓷; 纤维复合材料; 防弹性能; 数值模拟

**中图分类号:** TB3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)05-0497-08

## Numerical Simulation of Bulletproof Performance of Spliced Ceramic Composite Armor

CHEN Zhiyong<sup>1</sup>, XU Yingqiang<sup>2</sup>, CHENG Guangwei<sup>1</sup>, LI Miaoling<sup>1</sup>, LIU Jianshou<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Ceramic composite armor is a bulletproof form of bulletproof vehicle, according to the requirements of light-weight bulletproof vehicle, the structural design of spliced ceramic composite armor is carried out. A simulation method based on the finite element software ANSYS/LS-DYNA is proposed, for calculating the influence of shape and size of ceramic piece on the bulletproof performance of ceramic plate, and the target shooting test is carried out. By comparing the numerical simulation results with the test results, it is shown that the numerical simulation can well simulate the bullet penetration process on the spliced ceramic composite armour. The bulletproof performance of the ceramic plate spliced by larger-sized pieces is better than that of the plate spliced by smaller ceramic pieces with the same shape, the bulletproof performance of the ceramic plate spliced by hexagonal pieces is better than that of the plate spliced by regular quadrilateral pieces with the same area.

**Key words:** composite armor; ceramic; fiber composite; bulletproof performance; numerical simulation

## 1 前言

陶瓷材料由于具有硬度高、强度高、密度低等优异特性, 近年来已成为国内外防弹领域研究的热点<sup>[1]</sup>, 并开始应用于军用装甲车辆、武装直升机、高端防弹汽车

等领域。国内外大量学者从材料、结构设计、制备工艺、防弹机理等多方面对陶瓷防弹材料的防护性能进行实验研究和模拟研究<sup>[2-6]</sup>。但由于陶瓷复合装甲结构和材料的复杂性, 国内外对防弹陶瓷形状、尺寸对防弹性能影响的研究仅局限于定性的分析讨论; 数值模拟中将拼接而成的陶瓷面板作为一个整体面板, 仅进行厚度方向的模拟分析。将数值模拟和实验相结合, 对拼接陶瓷复合装甲的防护性能进行定量分析研究方面尚属空白。

本文以防弹陶瓷形状、尺寸对拼接式陶瓷复合装甲的防弹性能影响为研究目标, 提出数值模拟方法, 并与陶瓷复合装甲打靶数据进行比对, 探究陶瓷片形状和尺寸对陶瓷复合装甲防弹性能的影响, 为今后陶瓷复合装甲的结构设计提供理论基础和参考数据。

收稿日期: 2017-8-21 修回日期: 2017-12-11

基金项目: 河南省自然科学基金项目(162300410197); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(192102210026, 182102310043); 河南省高等学校重点科研项目(17A535001, 17A430024)

第一作者: 陈智勇, 男, 1984 年生, 讲师, Email: 1854@163.com

通讯作者: 徐颖强, 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师,

Email: xuyngqng@nwpu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.05.11

2 材料设计

2.1 结构形式

陶瓷材料性能优异,但存在成型尺寸较小、塑性差、断裂强度低等不足,这些特性使陶瓷不能作为均质防弹材料单独应用,必须有背板对其支撑<sup>[7,8]</sup>。要充分发挥陶瓷的防弹性能优势,背板材料既要能抗击子弹的冲击动能,又要有充足的刚度以支撑陶瓷材料<sup>[9]</sup>,面板和背板之间用特种橡胶胶粘剂粘接。另外在陶瓷外侧增加止裂层以增强防弹车辆的防护效果,并将整个陶瓷复合装甲依附到产品外形板面上,具体结构形式如图 1 所示。

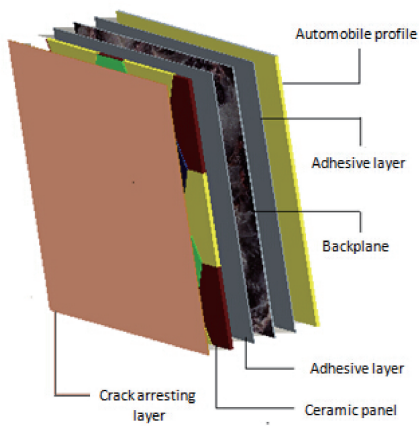


图 1 陶瓷复合装甲结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of ceramic composite armour

作为防弹面板的陶瓷,目前主要有大尺寸整块陶瓷作为面板和小块陶瓷拼接成面板两种方式,分别如图 2 和图 3 所示。目前整块陶瓷板已经可以规模化制造,成型率高、防弹均一性较好<sup>[10]</sup>,但其受到子弹冲击后破损面较大,易造成陶瓷面板的整体刚度降低;且对不同形状的背板需定制整块陶瓷成型模具,曲面成型工艺难度大、成本高。而拼接陶瓷面板抗多发打击能力强,且对

不同形状的背板可快捷地进行拼接,不需定制专门的模具,成本较低,因此本研究选用主流形式的拼接式陶瓷面板<sup>[11]</sup>。



图 2 大尺寸整块陶瓷面板  
Fig. 2 Large size ceramic panel

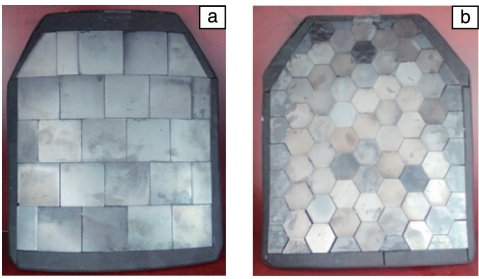


图 3 正四边形陶瓷片拼接的面板(a)和正六边形陶瓷片拼接的面板(b)  
Fig. 3 Panels spliced by quadrangular ceramic pieces (a) and hexagon ceramic pieces (b)

2.2 面板的材料选择

弹性模量、硬度和密度是影响陶瓷防弹性能的关键性能指标。高弹性模量可使子弹在撞击时变形和压缩;高硬度确保子弹侵彻陶瓷片时被陶瓷片犁削和粉碎,并被吸收能量;低密度则满足装甲车辆对防弹材料轻量化要求。氧化铝、碳化硅、碳化硼和氮化硅是常见的陶瓷防弹材料<sup>[12-14]</sup>,从表 1 可看出,碳化硅陶瓷硬度和密度居中,防弹性能和价格介于氧化铝和碳化硼之间,成为复合防弹装甲选材的首选,本研究采用碳化硅陶瓷作为防弹面板材料。

表 1 常用防弹陶瓷片材料的性能<sup>[12-14]</sup>

Table 1 Properties of common ballistic ceramic disk materials<sup>[12-14]</sup>

Ceramic	Density /(g/cm <sup>3</sup> )	Elastic modulus /GPa	Hardness, HV/GPa	Bending strength/GPa	Compressive strength/GPa	Price relative to Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
B <sub>4</sub> C	2.5	400	30	0.5~0.8	1.9~2.8	×10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.6~3.9	340	16	0.14~0.2	2.0~2.7	1
SiC	3.1~3.3	370~450	27	0.4~0.5	2.0~2.5	×5
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.2	310	17	0.9~1.0	3.5~3.8	×5

2.3 背板的材料选择

背板主要作用有两个,一是支撑陶瓷面板材料,二

是吸收子弹的残余动能。因此背板材料应该具有较高的刚度,并具有足够的厚度和弹性模量,保证能承受陶瓷

碎片及破碎弹片的冲击。表2列出几种常见背板材料的性能指标,从表中可看出纤维背板的防弹性能远高于金

属背板<sup>[15, 16]</sup>,本研究采用 UHMWPE 纤维复合材料作为背板材料。

表2 几种背板材料性能指标对比<sup>[15, 16]</sup>

Table 2 Comparison of performance indexes of several kinds of back plane materials<sup>[15, 16]</sup>

Back plane material	Extensibility /%	Density/(g/cm <sup>3</sup> )	Manufacturability	Cost	Protection effect
Hard aluminum alloy	8.4	2.7	Better	Low	Bad
Bulletproof steel	8.0	7.8	Better	Midle	General
Fiberglass	2.0~4.0	1.8	Better	Higher	Better
Aramid fiber	1.4~3.2	1.4	General	High	Good
UHMWPE fiber	4.0~8.7	0.97	General	High	Very Good

### 3 数值模拟

#### 3.1 理论分析及数值模拟方案

从理论和工艺来讲,拼接式陶瓷片可制作成各种形状,目前主要有圆形、正四边形和正六边形陶瓷片<sup>[17]</sup>。就单块陶瓷片防弹性能而言,弹着点落到陶瓷片中心位置附近的几率越大,越容易形成完整的破碎锥,防弹性能越好。为更直观表述,取不同形状、相同面积的陶瓷片,从陶瓷片中心点位置向陶瓷片边沿位置引出距离最短线,如图4所示,可以看出陶瓷片形状越接近圆形, $d$ 值越大,也就是说越容易形成完整的破碎锥,从而可得出单块陶瓷片圆形防弹性能最好,正六边形次之,正四边形再次之,正三角形和奇异形防弹性能最差。但圆形陶瓷片拼接后间隙过大,其应用范围得到限制;正方形陶瓷片拼接后虽存在直缝影响了防弹性能,但成型简单,且可通过错排的方式消除直缝;正六边形陶瓷片排列后单块与相邻6块正六边形陶瓷粘接,结合紧密<sup>[18]</sup>。本研究选用广泛应用的正四边形和正六边形陶瓷片进行模拟分析和试验对比验证。

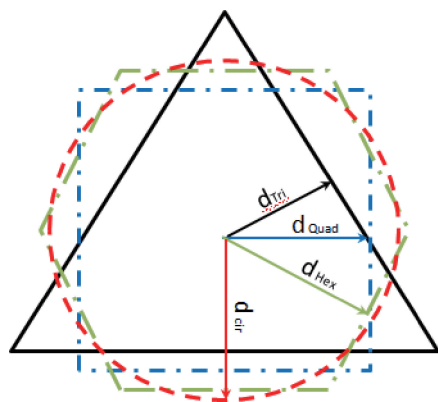


图4 不同形状、相同面积陶瓷片叠加示意图

Fig.4 Superposition of ceramic pieces with different shapes and the same area

利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对子弹侵彻靶板过程进行数值模拟,对比相同面积的正四边形和正六边形碳化硅陶瓷片组成的复合装甲防弹性能,寻求防弹性能相对优异的陶瓷片形状;然后模拟分析、对比相同形状、不同尺寸陶瓷片组成的复合装甲防弹性能,寻求防弹性能相对优异的陶瓷片尺寸。

#### 3.2 几何模型

共对4组靶板的防弹性能进行模拟分析,靶板尺寸设为300 mm × 250 mm × 15 mm,其他几何参数如表3所示。

表3 模拟分析采用的几何参数

Table 3 Geometric parameters employed in numerical simulations

No. of target plate	Shape of ceramic pieces	Thickness of ceramic pieces/mm	Side length of ceramic pieces /mm	Thickness of fiberboard /mm
1	Square	6	50	9
2	Square	6	77	9
3	Regular hexagon	6	48	9
4	Regular hexagon	6	60	9

为使分析对比结果具有针对性和真实性,4块靶板中心位置都设置为一块完整的陶瓷片,子弹垂直射击靶板中心。为减少计算机运算量,结合子弹、靶板系统几何形状和材料行为的对称性,取靶板和子弹的四分之一建立子弹侵彻靶板几何模型,如图5所示。

#### 3.3 材料模型

陶瓷面板采用 JH-2 材料模型,复合纤维背板采用带损伤的 Composite Damage Model 复合材料模型,子弹材料选用 Johnson-Cook 模型,状态方程采用 Gruneisen 模型<sup>[19, 20]</sup>。

##### 3.3.1 陶瓷面板材料参数

JH-2 本构模型是现在应用较多的、专门针对陶瓷等脆性材料的本构模型。其表达式为:

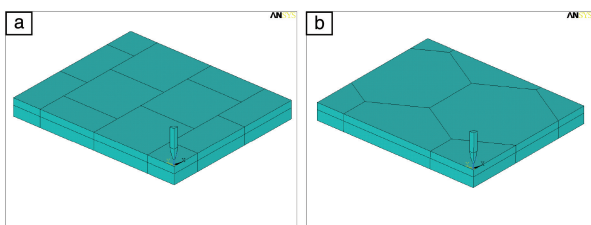


图 5 子弹侵彻靶板 1、2(a)和靶板 3、4(b)的几何模型

Fig. 5 Geometrical models of bullet penetrating target plates:

(a) no. 1 and no. 2, (b) no. 3 and no. 4

$$\sigma' = (1 - D)\sigma'_i + D\sigma'_f \quad (1)$$

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^p}{\varepsilon_f^p} \quad (2)$$

$$p = \begin{cases} K_1 u + K_2 u^2 + K_3 u^3, & u \geq 0; \\ K_1 u, & u < 0. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\sigma'_i$  为完好材料的无量纲 Mises 等效应力,  $\sigma'_i = A(p' + T')^N [1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_o})]$ ;  $\sigma'_f$  为损伤材料的无量纲

Mises 等效应力,  $\sigma'_f = B p'_M [1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_o})]$ ;  $p'$  和  $T'$  分别为

无量纲压力和无量纲最大负静水压力;  $u = \frac{\rho}{\rho_o} - 1$ ; 无量

纲 Mises 等效应力  $\sigma'$  和无量纲压力  $p'$  的归一化单位各为材料的 Hugoniot 等效屈服应力  $\sigma'_{HEL}$  和 Hugoniot 屈服压力  $p_{HEL}$ ; 损伤  $D$  定义为累计塑性应变和失效应变 ( $\varepsilon_f^p = D_1 (p' + T')^{D_2}$ ) 之比, 选取的碳化硅陶瓷模型参数如表 4 所示。

表 4 碳化硅陶瓷材料参数

Table 4 Parameters of SiC ceramic materials

Parameter	Value	Parameter	Value
$\rho/(g/m^3)$	3.2	$T/GPa$	0.27
$G/GPa$	155	$D_1$	0.005
$A/GPa$	0.88	$D_2$	0.7
$B/GPa$	0.28	$K_1$	193
$C$	0.003	$K_2$	212
$M$	0.6	$K_3$	185
$N$	0.64	$FS$	1.6
$EPSI$	1.0		

### 3.3.2 纤维背板材料参数

带损伤的 Composite Damage Model 材料模型的应力应变关系为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_1 \sigma_2) \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_2 \sigma_1) \\ \varepsilon_3 = \frac{1}{E_3}(\sigma_3 - \nu_3 \sigma_1) \\ 2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3 \\ 2\varepsilon_{13} = \frac{1}{G_{13}}\tau_{13} + \alpha\tau_{13}^3 \\ 2\varepsilon_{23} = \frac{1}{G_{23}}\tau_{23} + \alpha\tau_{23}^3 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}$  分别是材料纵向、横向、法向拉伸应变和面内剪应变;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$  分别是材料纵向、横向、法向拉伸应力和面内剪应力;  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  分别是纵向、横向和法向泊松比;  $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}$  分别是纵向、横向、法向拉伸模量和面内剪切模量;  $\alpha$  为非线性剪切应力参数。背板采用 UHMWPE 纤维复合材料, 具体模型参数列于表 5。

该模型采用 Chang-Chang 失效准则, 主要包含纤维断裂失效准则和压缩破坏失效准则, 并假设纤维基体间界面粘接理想, 力学性能参数由组分和各组分的体积含量计算得到<sup>[21]</sup>。

表 5 UHMWPE 纤维复合材料模型参数

Table 5 Model parameters of UHMWPE fiber composite

Parameter	Value	Parameter	Value
$E_1/GPa$	4.2	$\rho/(g/m^3)$	0.97
$E_2/GPa$	39	$X_T/MPa$	966
$E_3/GPa$	39	$X_c/MPa$	292
$G_{12}/GPa$	1.21	$S_{12}/MPa$	2.13
$G_{13}/GPa$	3.014	$S_{13}/MPa$	31.4
$G_{23}/GPa$	3.014	$S_{23}/MPa$	31.4
$\nu_1/\nu_2/\nu_3$	0.0314	$S_T/MPa$	11.78

### 3.3.3 子弹材料参数

子弹采用钢弹, 数值分析中子弹采用的 Johnson-Cook 模型方程式不再详述, 材料参数如表 6 所示。

### 3.4 有限元模型

用 8 节点六面体单元 solid185 对子弹和靶板进行网格划分, 划分后的有限元模型如图 6 所示, 受子弹冲击力大的靶板中心位置网格划分比较密集, 其他区域网格划分相对稀疏。对靶板四周进行位移约束, 子弹采用  $7.62 \times 39$  mm 钢弹, 对子弹施加 695 m/s 的法向速度载荷(北约 AEP-55 STANAG 4569 防护标准中的 II 级)。



表6 子弹材料参数

Table 6 Bullet material parameter

Parameter	Value	Parameter	Value
$\rho/(\text{g}/\text{m}^3)$	7.83	TR(K)	298
$G/\text{GPa}$	80.80	EPSO	1.00
$A/\text{GPa}$	0.792	$\text{CP}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	477.00
$B/\text{GPa}$	0.51	PC/GPa	-800
$E/\text{GPa}$	210	SPLL	2.00
PR	0.30	$D_1$	0
N	0.26	$D_2$	0
C	0.01	$D_3$	0
M	1.03	$D_4$	0
TM(K)	2070	$D_5$	0

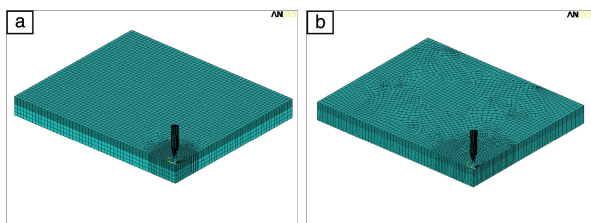


图6 子弹侵彻靶板1、2(a)和靶板3、4(b)的有限元模型

Fig. 6 Finite element models of bullet penetrating target plates: (a) no. 1 and no. 2, (b) no. 3 and no. 4

在进行数值模拟分析时，对子弹和靶板、相邻陶瓷片之间定义接触，采用单面侵蚀接触算法。子弹高速冲

击靶板是高度非线性问题，为减少运算量和提高计算可靠性，本计算采用点积分，但零点积分易引起沙漏变形模式，从而导致计算数值震荡。本计算采用 Standatd 算法来控制沙漏变形，即在单元各节点处沿  $x_i$  轴方向引入沙漏粘性阻尼力：

$$f_{ik} = -a_k \sum_{j=1}^4 h_{ij} \Gamma_{jk} \quad (5)$$

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^8 x_i^k \Gamma_{jk} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, 3; k = 1, 2, \dots, 8$$

式中， $h_{ij}$  为沙漏模态的模，负号表示沙漏阻尼分量  $f_{ik}$  的方向与沙漏模态  $\Gamma_{jk}$  的变形方向相反；

$$a_k = Q_{kg} \rho V_e^{2/3} C/4 \quad (7)$$

式中， $V_e$  为单元体积， $C$  为材料声速， $Q_{kg}$  为用户定义的常数，本计算取值 0.1， $\rho$  为当前质量密度。

## 4 结果分析

### 4.1 子弹侵彻靶板过程分析

在子弹冲击陶瓷表面时，子弹头部发生变形产生压缩波，压缩波移动到弹体和陶瓷表面后被反射回来，形成沿冲击方向的自由应力波，波前端产生巨大应力，使陶瓷出现裂纹。如图 7 所示，应力波到达靶板后迅速向四周扩散，使裂纹迅速向四周呈放射状发展，应力波在向四周传递过程中受到陶瓷片边界的限制，可限制陶瓷裂纹的进一步扩展，使陶瓷形成一个圆锥结构<sup>[22]</sup>。

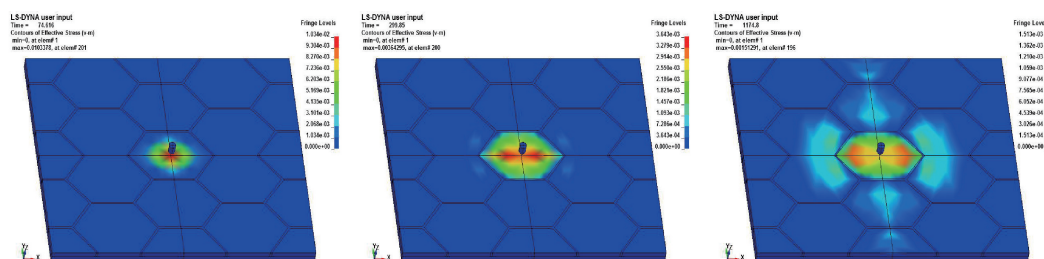


图7 子弹侵彻正六边形陶瓷面板应力波传递过程

Fig. 7 Stress wave propagation when bullet penetrating a hexagonal ceramic panel

在冲击陶瓷过程中子弹因头部受挫而变钝，其所受阻力新一步增大，动能降低后的子弹继续侵彻纤维背板，纤维增强复合材料通过本身的拉伸破坏继续消耗大量的子弹动能<sup>[23]</sup>，首先发生剪切破坏，紧接着出现拉伸破坏，然后由于纤维拔脱导致复合材料层间分层，进而在背板后侧形成较大变形的圆形“背凸”<sup>[24]</sup>。图 8 为子弹侵彻靶板的数值模拟结果，较好地反映子弹侵彻陶瓷复合装甲的破坏机理。



图8 子弹侵彻靶板的数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation result of bullet penetrating target plate

### 4.2 模拟结果分析

子弹侵彻速度、深度和背凸尺寸是评估子弹贯穿能力和靶板防弹性能的重要指标，一般子弹从射出到侵彻靶板后剩余速度归零间隔时间越小，说明靶板防弹性能

越优异；子弹侵彻深度、背凸高度、半径越小，说明靶板防弹性能越优异<sup>[25]</sup>。

模拟获得的子弹侵彻靶板速度-时间历程曲线、位移-时间历程曲线、动能-时间历程曲线分别如图 9、图 10 和图 11 所示。从图中可看出，侵彻初期，子弹冲击靶板后侵彻速度近似成线性下降，剩余动能急剧减小；随着侵彻的深入，破碎的陶瓷对子弹的侵彻阻力减小，子弹侵彻速度下降变缓。当子弹侵彻到陶瓷与背板结合面时，纤维进一步消耗子弹动能，使子弹速度快速降低；随着纤维的破坏，子弹速度缓慢下降，直至为零，即子弹停留在纤维背板中；甚至子弹在纤维背板的反作用力下反

弹，形成与冲击方向相反的较小速度。

将子弹侵彻靶板速度-时间历程曲线、位移-时间历程曲线与打靶试验结果相结合，统计分析 4 个靶板的防弹性能，并将数值模拟结果和试验结果的关键指标进行对比，如表 7 所示。从表中可以看出，靶板 4 的防弹性能最优，靶板 3 的防弹性能次之，靶板 2 的防弹性能再次之，靶板 1 的防弹性能最差。即正六边形陶瓷片的防弹性能要优于相同面积的正四边形陶瓷片的防弹性能；相同形状的陶瓷片，面积较大陶瓷片的防弹性能要优于面积较小陶瓷片的防弹性能。

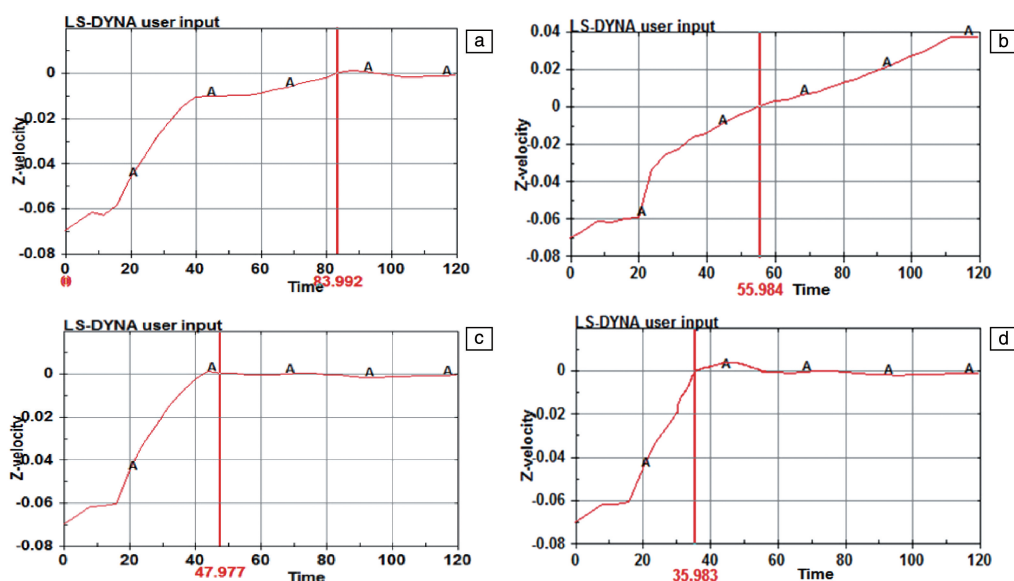


图 9 子弹侵彻靶板的速度 ( $\text{cm}/\mu\text{s}$ )-时间 ( $\mu\text{s}$ ) 历程曲线: (a) No. 1 靶板; (b) No. 2 靶板; (c) No. 3 靶板; (d) No. 4 靶板

Fig. 9 Velocity ( $\text{cm}/\mu\text{s}$ )-time ( $\mu\text{s}$ ) curves of bullet penetrating target plates: (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4

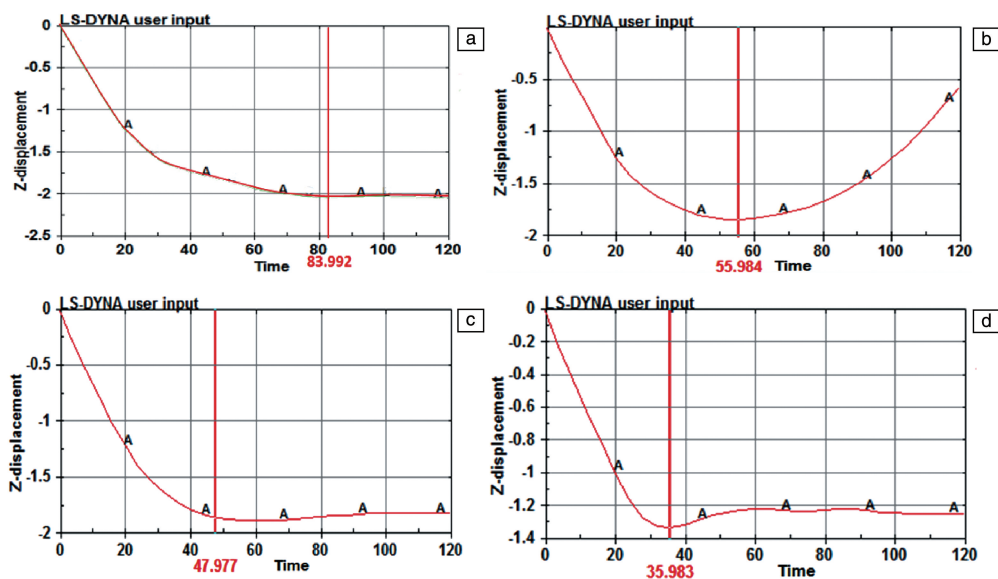


图 10 子弹侵彻靶板的位移 ( $\text{cm}$ )-时间 ( $\mu\text{s}$ ) 历程曲线: (a) No. 1 靶板; (b) No. 2 靶板; (c) No. 3 靶板; (d) No. 4 靶板

Fig. 10 Displacement ( $\text{cm}$ )-time ( $\mu\text{s}$ ) curves of bullet penetrating target plates: (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4

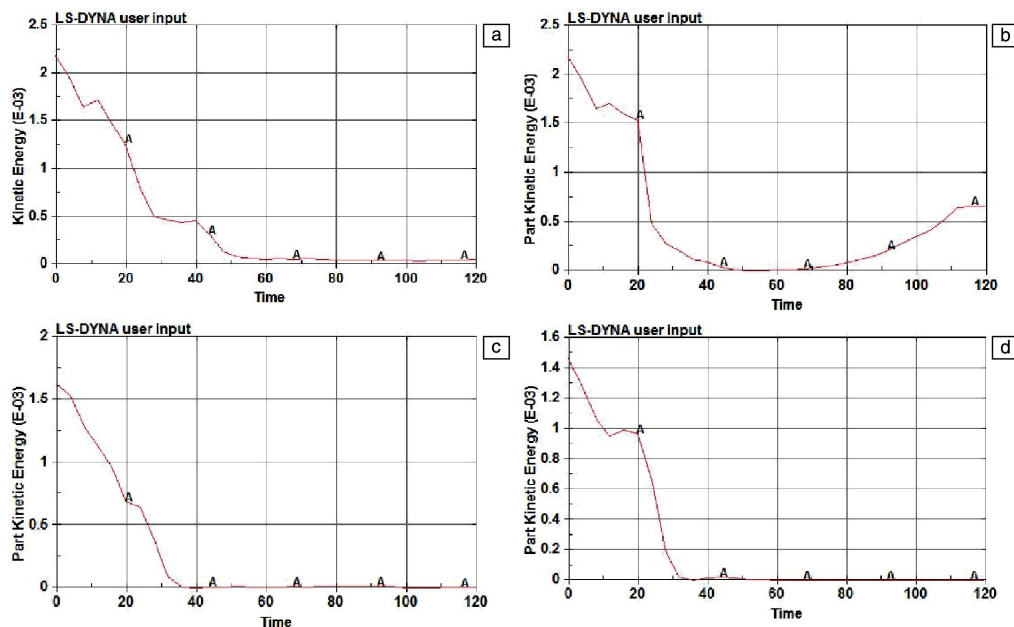
图 11 子弹侵彻靶板的动能(kJ)-时间( $\mu$ s)历程曲线: (a) No. 1 靶板, (b) No. 2 靶板, (c) No. 3 靶板, (d) No. 4 靶板Fig. 11 Energy(kJ)-time( $\mu$ s) curve of bullet penetrating target plates: (a) No. 1, (b) No. 2, (c) No. 3 and (d) No. 4

表 7 数值模拟结果与试验结果对比

Table 7 Comparison of numerical simulation results with the test results

Target plate no.	Penetration status	Simulated zero velocity time of bullet / $\mu$ s	Penetration depth/mm		Back convex height/mm		Back convex diameter/mm	
			Simulated value	Test mean value	Simulated value	Test mean value	Simulated value	Test mean value
1	Not penetrated	83.992	20.3	19.7	17.0	18.1	40.1	43.1
2	Not penetrated	55.984	18.7	19.0	16.4	16.8	39.8	42.7
3	Not penetrated	49.997	18.3	18.8	16.2	16.7	39.8	42.8
4	Not penetrated	35.983	13.8	16.9	15.9	16.4	39.6	42.0

### 4.3 试验对比

按照北约 AEP-55 STANAG 4569 的 II 级防护标准, 对所设计的 4 种规格靶板分别取 2 块进行打靶试验, 每块靶板各射击 6 发子弹。如图 12 所示, 射击后的靶板面板和背板粘接良好, 背凸高度和直径数值较小, 大小分布较为一致; 弹着点未发生大面积的陶瓷脱落现象, 陶瓷裂纹呈放射状, 破损的弹头留在弹孔底部。试验结果与图 7 和图 8 中的数值模拟结果进行比对, 应力传递方式、破坏形式基本吻合; 表 7 中列出打靶试验统计结果, 子弹侵彻深度、背凸高度和直径与数值模拟结果基本一致, 进一步验证本数值模拟的合理性。

## 5 结 论

本文首先设计了陶瓷/纤维复合装甲结构形式, 然后利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对所设计的复合装甲的防弹性能进行数值模拟, 分析比对不同形状、尺寸陶



图 12 子弹侵彻后前面板(a)、背板(b)和弹坑(c)照片

Fig. 12 Photos of the front panel (a), back plate (b) and crater (c) after bullet penetration

瓷片拼接的复合装甲的防弹性能, 并与试验结果进行对比, 得到以下结论:

(1) 结合 Johnson-Cook 模型(描述子弹材料)、JH-2 模型(描述陶瓷面板)、Composite Damage Model 模型(描述纤维复合材料背板)和 Gruneisen 状态方程, 能较好模拟子弹对拼接式陶瓷复合装甲的侵入过程。

(2) 正六边形陶瓷片的防弹性能要优于相同面积的正四边形陶瓷片的防弹性能。

(3) 相同形状的陶瓷片, 面积较大陶瓷片的防弹性能要优于面积较小陶瓷片的防弹性能。

(4) 所设计的陶瓷复合装甲结构防弹性能满足防弹等级要求。

## 参考文献 References

- [1] Hou Hailiang(侯海量), Zhu Xi(朱 锡), Kan Yulong(阚于龙). *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2008, 29(2): 208-216.
- [2] Jin J C, Wang C. *Applied Mechanics & Materials*[J], 2013, 256-259: 2871-2876.
- [3] Han Hui(韩 辉), Li Jun(李 军), Jiao Lijuan(焦丽娟), et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2007, 21(2): 34-37.
- [4] Jiang Jie(江 洁), Dong Xia(董 侠), Chen Meiyu(陈美玉), et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2013, 27(6): 70-72.
- [5] Lundberg P, Renstrom R. *International Journal of Impact Engineering* [J], 2000(24): 259-275.
- [6] Lee M, Yoo Y H. *International Journal of Impact Engineering* [J], 2001(25): 819-829.
- [7] Liu Wei(刘 薇), Yang Jun(杨 军). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2011, 40(2): 108-111.
- [8] Li Shutao(李树涛), Zhong Tao(钟 涛), Miao Chen(苗 成), et al. *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2014(1): 1-5.
- [9] Grujicic M, Arakere G, He T, et al. *Materials Science and Engineering: A*[J], 2008, 498(1-2): 231-241.
- [10] Hu Liping(胡丽萍), Wang Zhihui(王智慧), Guo Ling(郭 领), et al. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*(弹箭与制导学报)[J], 2009, 29(2): 130-132.
- [11] Li Yongdong(李永东), Zhang Nan(张 男), Tang Liqiang(唐立强), et al. *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2003, 26(2): 11-14.
- [12] Zhang X, Fan X, Yan C, et al. *Applied Materials Interfaces* [J], 2012, 4(3): 1543-1552.
- [13] Guo Zhongren(郭忠仁), Du Wenzhe(杜文泽), Wang Shulun(王树伦), et al. *Engineering Plastics Application*(工程塑料应用)[J], 2009, 37(1): 75-78.
- [14] Zheng Zhen(郑 震), Yang Nianci(杨年慈), Shi Meiwu(施楣梧), et al. *Journal of Materials Science and Engineering*(材料科学与工程学报)[J], 2005, 23(6): 905.
- [15] Chen W, Tao Z, Fan L, et al. *Journal of Applied Polymer Science* [J], 2011, 119(6): 3162-3169.
- [16] Kim H, Nam I. *Journal of Applied Polymer Science*[J], 2012, 123(5): 2733-2742.
- [17] Liu Sheng(刘 胜), Lv Panke(吕攀珂), Zhang Yanpeng(张艳朋). *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2011, 34(6): 84-86.
- [18] Li Maohui(李茂辉), Huang Xiancong(黄献聪), Wang Lei(王 雷), et al. *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2011, 34(6): 99-101.
- [19] Wang Peng(王 鹏). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [20] Xu Ying(徐 颖), Xi Yingxin(郗英欣), Lu Fengji(卢凤纪). *Journal of Xi'an Jiaotong University*(西安交通大学学报)[J], 1999, 33(10): 108-110.
- [21] Zhao Junshan(赵俊山), Wang Yongxiang(王勇祥), Qiu Guijie(邱桂杰), et al. *Fiber Reinforced*(玻璃钢/复合材料)[J], 2005(1): 22-24.
- [22] Grujicic M, Bell W C, Pandurangan B, et al. *Materials & Design* [J], 2012, 34: 808.
- [23] Zhang Youfeng(张有凤), Zhao Peiran(赵沛然), Zhang Guobin(张国斌). *Foreign Tank*(国外坦克)[J], 2009, 6: 48-53.
- [24] Hu Liping(胡丽萍), Wang Heping(王和平), Wang Zhihui(王智慧), et al. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*(弹箭与制导学报)[J], 2010, 30(5): 90-92.
- [25] Zhang Xinjie(张新杰). *Development and Application of Materials*(材料开发与应用)[J], 2012, 27(2): 103-106.

(编辑 惠 琼)