文章编号：1001-1455(2014)01-0047-05

# 包覆板材料为陶瓷时平板装药的防护性能*

李如江[1]，韩宏伟[2]，孙素杰[2]，刘天生[1]
(1. 中北大学安全工程系，山西 太原 030051；
2. 中国兵器工业第五二研究所冲击环境材料技术重点实验室，山东 烟台 264003)

**摘要**：运用口径 36 mm 的精密成型装药实验，研究了等效厚度相同的碳化硅和氧化铝陶瓷平板装药的防护性能，并与包覆材料为钢的平板装药进行了对比。运用 LS-DYNA3D 软件，对平板装药与聚能装药的作用过程进行了三维数值模拟。实验结果显示，对于此结构的平板装药，碳化硅和氧化铝陶瓷平板装药使聚能装药侵彻能力分别下降了 88%和 82%，优于钢板的防护性能。数值模拟结果显示，陶瓷包覆板从边缘至中心依次出现断裂和粉碎现象，钢板与射流后部作用为断续干扰，而陶瓷板为连续干扰。

**关键词**：爆炸力学；防护性能；LS-DYNA3D 软件；平板装药；氧化铝陶瓷；碳化硅陶瓷；聚能装药
**中图分类号**：O383.3　　**国标学科代码**：1303520　　**文献标志码**：A

平板装药，又称爆炸反应装甲(explosive reactive armour, ERA)，首先由 M. Held[1] 发明，由于具有防护效益高、重量轻、装卸方便、成本低等优点，而广泛应用于现代装甲车辆的防护。传统的爆炸反应装甲结构为两层对称或非对称的钢板中间夹层炸药组成的三明治结构。当射流高速撞击具有一定倾角的爆炸反应装甲时，会引爆中间炸药层，钢板在高压、高速爆轰产物作用下，沿其法线方向高速运动，对射流形成连续或断续切割，使射流受到严重干扰，从而降低射流对主装甲的侵彻能力。

对传统平板装药的大量研究[2-5]表明，它爆炸后会产生大量的高速破片(通常达 500～1 500 m/s)，有可能对战场己方人员和车辆造成损伤，因此需寻找新的材料替代传统的钢板。H. Kaufmamnn 等[6]对低密度包覆板材料(包括铝、陶瓷、玻璃钢等)进行了实验研究，发现低密度材料具有和钢一样的防护效能，且附带损伤明显降低。P. J. Hazell 等[7]运用 X 射线研究了陶瓷和硼硅玻璃等包覆板材料与射流的作用，发现脆性包覆板在爆炸产物作用下会很快破碎成碎末，可有效降低对周围环境的损伤。王玲等[8]进行了纤维增强复合材料为包覆板材料时反应装甲的抗弹性能的实验研究，发现其具有较好的防弹效果，且可以消除爆炸反应装甲的二次杀伤效应。

本文中，使用口径 36 mm 的精密成型装药，进行包覆板为氧化铝和碳化硅陶瓷时平板装药的抗弹性能的实验研究，并与等重厚钢板平板装药进行对比。运用 LS-DYNA3D 软件对作用过程进行三维数值模拟，拟为平板装药包覆板新材料的选用提供参考。

## 1 实　验

### 1.1 抗射流侵彻实验

用穿深检验陶瓷包覆板对射流的防护性能。图 1 为实验装置示意图，包括聚能装药、陶瓷平板装药和后效靶，通过测量残余射流在后效靶上的穿深衡量其防护性能。选用氧化铝陶瓷和碳化硅陶瓷作为平板装药的面背板材料，并与 45 钢板进行对比。其中，氧化铝陶瓷板($w(Al_2O_3)=99.3\%$)的厚度为 5.1 mm，密度为 4.05～4.10 g/cm$^3$；碳化硅陶瓷板的厚度为 6.4 mm，密度为 3.8～3.9 g/cm$^3$；钢板厚 2.5 mm，密度为 7.85 g/cm$^3$。夹层炸药为 B 炸药，密度为 1.715 g/cm$^3$，药厚为 4 mm。后效靶为 603 装甲钢，平板装药距后效靶 69 mm，倾角均为 30°。精密聚能装药口径为 36 mm，当炸高为 26 mm 时，3 发平均穿深为 100 mm。

* **收稿日期**：2012-05-29；**修回日期**：2012-08-20
**作者简介**：李如江(1978— )，男，博士，副教授。

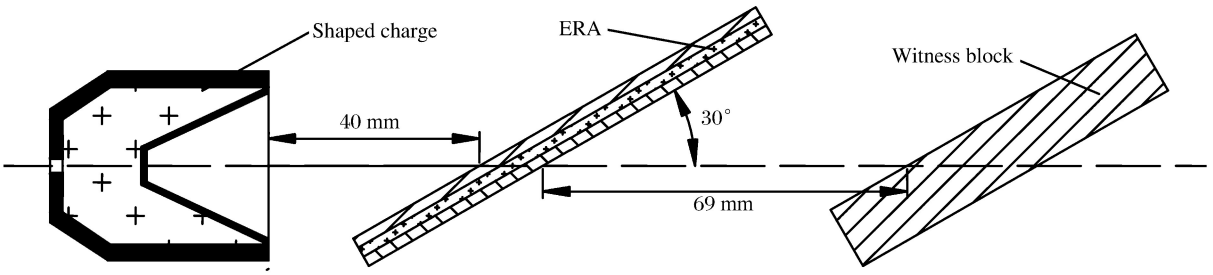



图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

### 1.2 实验结果

侵彻实验后，测量后效靶上最大残余穿深衡量平板装药的防护效能，通过观察后效靶表面的损伤情况衡量平板装药的损伤效应。对不同包覆板材料的平板装药进行单发实验，结果如表 1 和图 2 所示，其中 $a$、$b$ 和 $c$ 为弹坑的长、宽和穿深，$l$ 为压痕深度。可见，碳化硅和氧化铝陶瓷平板装药的防护水平优于 45 钢，且碳化硅陶瓷比氧化铝陶瓷更优。

**表 1 不同包覆板材料平板装药的防护性能**

**Table 1 Protection performance of ERA with different plate materials**

| 包覆板材料 | $a$/mm | $b$/mm | $c$/mm | $l$/mm |
|---|---|---|---|---|
| SiC | 15 | 10 | 6 | 麻点 |
| 45 steel | 25 | 10 | 10 | 2～3 |
| $Al_2O_3$ | 25 | 11 | 9 | 麻点 |




图 2 实验结果

Fig. 2 Comparisons of the experimental results

## 2 数值模拟

### 2.1 计算模型

采用非线性有限元 LS-DYNA3D 软件对聚能射流和平板装药的作用过程进行数值模拟计算。采用 ALE 算法，此种算法中包括拉格朗日与欧拉两种算法。由于在欧拉算法中，网格固定不动，材料和能量在网格间运动，所以在建立模型时不仅包括金属射流部分，还需加入空气。根据结构的对称性，考虑计算时间与周期，建立 1/2 模型，模型包括聚能装药、空气、平板装药三部分。其中聚能装药、空气采用欧拉法，平板装药采用拉格朗日算法。

### 2.2 材料参数

聚能药柱使用 8701 炸药压制，采用高能燃烧材料模型和 JWL 状态方程描述。其主要参数为：$\rho_0=1.685\ \mathrm{g/cm^3}$，$D=8\ 130\ \mathrm{m/s}$，$A=625.3\ \mathrm{GPa}$，$B=23.29\ \mathrm{GPa}$，$R_1=5.25$，$R_2=1.6$，$\omega=0.28$。

紫铜药型罩、45 钢聚能装药壳体以及平板装药包覆板，使用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程描述：

$$\sigma=(A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{*})(1+C\ln\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}^{*})[1-(T^{*})^{m}] \tag{1}$$

式中：$A$、$B$、$C$、$n$ 和 $m$ 为材料常数；$\varepsilon_{\mathrm{p}}^{*}$ 为有效塑性应变；$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}^{*}$ 为有效塑性应变率；$T_{\mathrm{m}}$ 为材料熔化温度；$T_{\mathrm{r}}$ 为室温。紫铜和 45 钢材料本构参数见表 2。

**表 2 紫铜和 45 钢的计算参数**

**Table 2 Calculating parameters for the copper and 45 steel**

| 材料 | $\rho$/(g·cm$^{-3}$) | $A$/GPa | $B$/GPa | $n$ | $C$ | $m$ | $T_m$/K | $T_r$/K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fe | 7.85 | 0.792 | 0.510 | 0.26 | 0.014 | 1.03 | 1 793 | 294 |
| Cu | 8.96 | 0.090 | 0.292 | 0.31 | 0.025 | 1.09 | 1 356 | 294 |

空气采用空物质材料模型，状态方程采用多线性状态方程描述，$\rho=1.25$ mg/cm$^3$。

夹层炸药为 B 炸药，采用 Lee-Tarver 反应模型[9]和 JWL 状态方程描述，Lee-Tarver 反应模型为：

$$\mathrm{d}\lambda/\mathrm{d}t = I(1-\lambda)^b(\rho/\rho_0 - 1 - a)^x + G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z \tag{2}$$

式中：$\lambda$ 为反应速率分数；$t$ 为时间，$p$ 为压力。B 炸药的计算参数分别为：$I=4.4\times10^{17}$ s$^{-1}$，$b=0.667$，$a=0$，$x=20$，$G_1=310$ GPa，$c=0.667$，$d=0.111$，$y=1.0$，$G_2=400$ GPa，$e=0.333$，$g=1.0$，$z=2.0$。

陶瓷材料采用氧化铝和碳化硅，使用 JH-2 模型描述材料在高压下的力学行为。模型主要包括了对材料的强度、压力和损伤的变化关系的描述。通过这 3 部份关系的耦合，可以描述完整材料和破碎材料的在载荷作用下的响应。陶瓷材料的本构参数见表 3。

**表 3 陶瓷的计算参数[10]**

**Table 3 Calculating parameters for SiC and $AL_2O_3$**

| 材料 | $G$/GPa | $A$ | $B$ | $C$ | $M$ | $N$ | $T$ | $\sigma_c$/GPa | $\sigma_{HEL}$/GPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SiC | 183.00 | 0.96 | 0.35 | 0 | 1.0 | 0.65 | 0.37 | 14.57 | 13 |
| $Al_2O_3$ | 90.16 | 0.35 | 0.31 | 0 | 0.6 | 0.60 | 0.20 | 2.79 | 2 |
| 材料 | $p_{HEL}$/GPa | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | $\beta$ | $D_1$ | $D_2$ | $\sigma_{f,max}$/GPa | |
| SiC | 5.90 | 204.8 | 0 | 0 | 1.0 | 0.480 | 0.480 | 1.0 | |
| $Al_2O_3$ | 2.79 | 131.0 | 0 | 0 | 1.0 | 0.005 | 1.00 | 1.0 | |

## 3 结果分析

包覆板的等效钢板厚度 $\delta_{equ}=\rho_p h_p/\rho_{Fe}$，$\rho_p$ 和 $h_p$ 为包覆板的密度和厚度。根据实验条件可以计算，氧化铝包覆板的等效钢板厚度为 2.50 mm，碳化硅陶瓷的等效钢板厚度为 2.51 mm，两者和 45 钢板的板厚几乎相同。根据 Gurney 公式，炸药爆炸后驱动飞板的运动速度为：

$$v=\sqrt{2E}(2m_m/m_e+0.333)^{-0.5} \tag{3}$$

式中：$\sqrt{2E}$为 Gurney 能，$m_m/m_e$ 为金属和炸药质量之比。可以看出，碳化硅陶瓷、氧化铝陶瓷以及 45 钢板在药厚都为 4 mm 时，爆炸后的驱动速度应近似相同，为约 1 000 m/s。由实验结果可以看出，氧化铝和碳化硅陶瓷平板装药使射流的垂直侵彻能力分别下降了 82%和 88%，而 45 钢平板装药使射流的侵彻能力下降了 80%，陶瓷板的防护性能不低于等重厚的钢板，趋势与文献[7]基本相符。

从图 2 后效靶表面的损伤结果可以看出：45 钢板在高速碰撞后效靶后，压痕比较完整、深度达到了 2～3 mm；而氧化铝和碳化硅陶瓷碰撞后的后效靶表面无完整痕迹，仅有大量麻点存在，凹坑深度较浅。说明陶瓷背板在此距离内已完全破碎，后效损伤与钢板相比已明显降低。

图 3 分别为碳化硅陶瓷、氧化铝陶瓷以及 45 钢包覆板不同时刻与射流作用的模拟结果。对比图 3 可以看出：当 $t=35$ μs 时，碳化硅陶瓷板经爆炸驱动后保持完整，而氧化铝陶瓷板内表面呈现破坏，原因是由于氧化铝陶瓷抗压强度较低所致。当 $t=45$ μs 时，出现了比较有趣的现象，从陶瓷板周边开始出现破碎和断裂，原因可能是陶瓷材料为典型的抗压不抗拉材料，在边界处由于爆轰产物的强烈剪切和稀疏波拉伸作用下，先从陶瓷板边缘出现破坏。当 $t=60$ μs 时，氧化铝陶瓷板已完全破碎，而碳化硅中间部分仍保持有一定的完整性，但是表面出现了裂纹。在 $t=45$ μs 时，45 钢板由于稀疏波的作用在周边出现了层裂，但整个过程保持完好，这也正是陶瓷材料在碰撞后效靶表面压痕不明显而钢板压痕比较深的原因。

对比图 3 还可以看出，钢板和陶瓷板与射流的作用机理不一样：当 $t=45$ μs 时，氧化铝陶瓷背板后出现了一定长度的逃逸射流，为整个射流长度的约 7%，随着射流的延伸，逃逸射流很快断裂成更小的碎片，而碳化硅陶瓷背板后的逃逸射流不明显。由于氧化铝陶瓷抗压强度较低，在冲击波作用下内表面破碎成更小的碎末，对射流的干扰作用减弱，造成射流头部逃逸。当 $t=60$ μs 时，氧化铝陶瓷由于破碎完全，其与射流尾部的作用减弱，而碳化硅仍保持一定的完整性，仍可与充分射流作用，此为碳化硅陶瓷板抗弹性能优于氧化铝的原因。45 钢板与射流作用后造成射流前部出现断裂，但无明显逃逸射流，与射流后部作用后使射流局部出现了大的失稳。模拟结果说明，钢板与射流尾部作用为断续干扰，而陶瓷板为连续干扰，其中钢板对射流的干扰周期为约 125 kHz，氧化铝为约 140 kHz，碳化硅为约 160 kHz。连续干扰后的射流射流在飞行过程中会很快断裂成破片，失去侵彻能力，而断续干扰后的射流在飞行过程中会进一步延伸，对后效靶仍具有一定的侵彻能力，造成钢反应装甲的防护性能低于等重厚氧化铝和碳化硅陶瓷反应装甲。

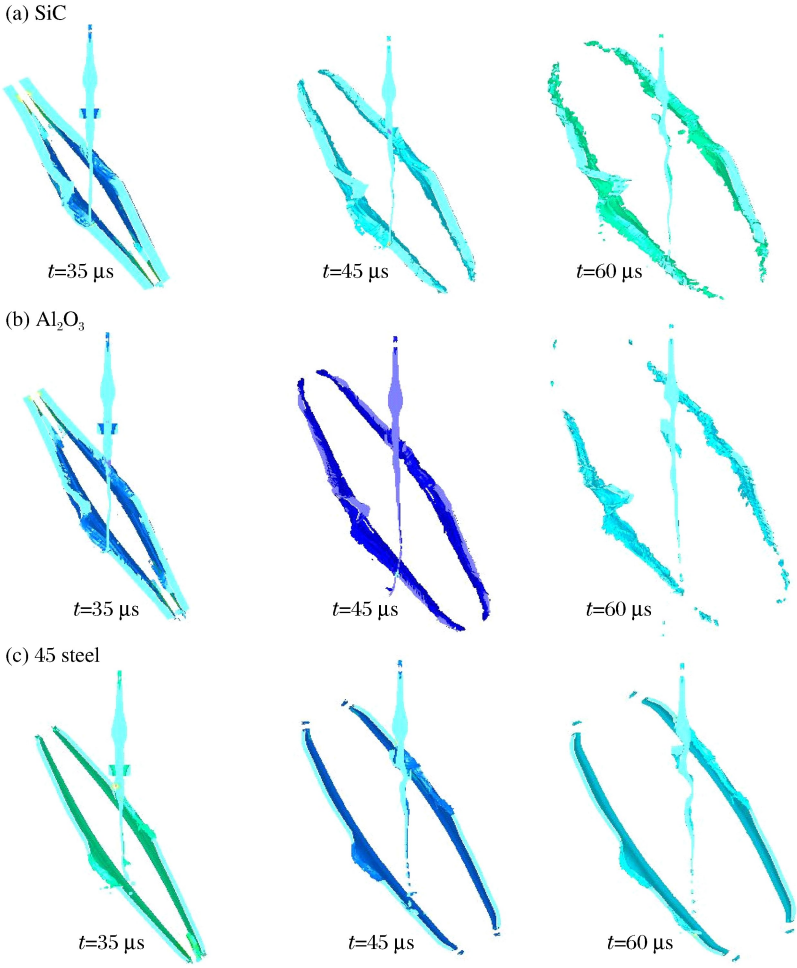



图 3 碳化硅、氧化铝和钢反应装甲与射流的作用过程的模拟结果

Fig. 3 Comparison of the interaction process between shaped charge jets and ERA with SiC, $Al_2O_3$ and steel plates

## 4 结 论

实验结果显示，碳化硅和氧化铝陶瓷平板装药具有优良的防护性能，对于此结构的平板装药，可使垂直穿深 100 mm 的聚能装药侵彻能力分别下降 88%和 82%，优于钢板的防护性能。钢包覆板与后效靶作用后有明显的压痕，而陶瓷包覆板仅在后效靶表面产生麻点，压痕不明显。

模拟结果显示，陶瓷包覆板先从边缘出现断裂和粉碎现象，逐渐向中心发展，当 $t=60$ μs 时，已基本破碎。钢板与射流尾部作用为断续干扰，而陶瓷板为连续干扰。

## 参考文献：

[1] Held M. Protection device against projectiles, especially shaped charges: Deutsches, 2358277[P]. 1973.

[2] Held M. Stopping power of explosive reactive armors against different shaped charge diameters or at different angles[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001,26:97-104.

[3] Held M. Momentum theory of explosive reactive armours[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001,26:91-96.

[4] Held M. Disturbance of shaped charge jets by bulging armour[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001, 26:191-195.

[5] 毛东方,李向东,宋柳丽. V 型夹层炸药对射流干扰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):86-91.
Mao Dong-fang, Li Xiang-dong, Song Liu-li. Numeriacal simulation of disturbance by sandwich explosive on jet [J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(1):86-91.

[6] Kaufmann H, Koch A. Terminal ballistic effects of low density materials used as confinement plates for explosive reactive armor[C]// Proceedings of the 22nd International Symposium on Ballistics. Vancouver, Canada, 2005:405-412.

[7] Hazell P J, Lawrence T, Stennett C. The defeat of shaped charge jets by explosively driven ceramic and glass plates [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2012,9(2):382-392.

[8] 王玲,郑威,辛培训,等. 纤维增强复合材料的制备及防护性能研究[J]. 工程塑料应用,2010,38(10):27-30.
Wang Ling, Zheng Wei, Xin Pei-xun, et al. Study on preparation and ballistic resistance of fiber reinforced composite[J]. Engineering Plastics Application, 2010,38(10):27-30.

[9] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980,23(12):2362-2369.

[10] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001.

# Ballistic resistance capabilities of explosive reactive armors encapsulated by ceramic layers*

Li Ru-jiang[1], Han Hong-wei[2], Sun Su-jie[2], Liu Tian-sheng[1]

(1. *Department of Safety Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;

2. *Science and Technology on Materials in Impact Environment Laboratory, No.* 52 *Institute of China Ordnance Industry, Yantai* 264003, *Shandong, China*)

**Abstract**: By using the precision shaped charge warheads with the caliber of 36 mm, anti-penetration experiments were conducted on the explosive reactive armors (ERAs) encapsulated by three different material layers with the same equivalent thickness, respectively. And the encapsulation layers were made of alumina, silicon carbide and steel plates, respectively. The experimental results show that for this armor configuration, after passing the ERAs with alumina and silicon carbide plates, the penetration depths of the shaped-charge jets decrease 82% and 88%, respectively, which are comparable to those in the cases of steel plates. And the interactions of the jets with the ceramic and steel plates were simulated by applying the finite-element code LS-DYNA3D. The simulation results display that after interaction with the jets, the ceramic plates shatter and break into pieces from the edge to the center. And the interaction mechanism between the shaped-charge jet back and the steel plate is an intermittent disturbance, whereas it is a continuous disturbance with the ceramic plates.

**Key words**: mechanics of explosion; protection performance; LS-DYNA3D; explosive reactive armour; alumina; silicon carbide; shaped charge

---

* Received 29 May 2012; Revised 20 August 2012
Corresponding author: Li Ru-jiang, lirujiang3002@sina.com

(责任编辑　丁　峰)