DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0637-06

基于复合面/背板的平板装药防护性能*

李如江[1],柴艳军[1],韩宏伟[2],刘天生[1]
(1.中北大学安全工程系,山西 太原 030051;
2.兵器工业第 52 研究所冲击环境材料技术重点试验室,山东 烟台 264003)

摘要:采用实验和数值模拟方法研究了橡胶复合板作为爆炸反应装甲面、背板时的防护性能,分析了两种反应装甲结构的防护机理,并与面密度相同的钢反应装甲进行了对比。实验结果表明:爆炸反应装甲面板或背板为橡胶复合板时的防护性能优于钢反应装甲,其中橡胶复合板作为背板时效果最优。数值模拟结果表明:橡胶复合板在爆炸驱动下外层钢板速度相比于钢反应装甲飞板提高 16%,橡胶复合板的界面效应及其飞板间隙可以有效减小逃逸射流的长度。

关键词:爆炸反应装甲;聚能装药;防护性能
中图分类号:O385 **国标学科代码**:1303530 **文献标志码**:A

反应装甲作为对抗聚能射流侵彻的有效装置之一,广泛应用于现代装甲车辆的防护,根据内层材料及其产生的效应不同,可分为爆炸反应装甲(explosive reactive armor, ERA)和被动反应装甲(passive armor)两大类[1-2]。其中爆炸反应装甲(也称平板装药)的典型结构为两层钢板夹层炸药组成的三明治结构,夹层炸药在射流的高速撞击下被引爆,驱动包覆板反向运动切割射流,使其产生断裂、偏折而失去侵彻能力。研究结果[3]显示:射流高速侵彻反应装甲过程中,在撞击点处形成一个高速扩张的孔,由于飞板运动和孔扩张的耦合,背板仅能与穿透反应装甲后射流头部后某处开始作用,未受到飞板干扰作用的射流部分称为逃逸射流。逃逸射流越长,后效穿深越大。因此,如何降低逃逸射流的长度是爆炸反应装甲设计的一个重要方向。研究人员试图采用新的结构设计来减少逃逸射流的长度,赵慧英等[4]通过反应装甲后附加装陶瓷复合装甲结构来提高其对逃逸射流的防护,H. J. Lee 等[5]通过在反应装甲后加衬板减小逃逸射流的长度,采用 AUTODYN 软件模拟了衬板材料对其防护性能的影响,S. Friling 等[6]通过在反应装甲后附加被动反应装甲以提高其防护能力,将射流简化为长杆对其作用过程进行了 2D 模拟,研究结果显示背板具有更高的速度,但是不能反映倾斜条件下与射流的作用过程。

被动反应装甲典型结构为两层钢板夹层惰性材料,由于具有射流防护效能好、附带损伤效应较小等优点而受到研究人员重视,目前已经有大量针对其防护性能及机理的研究[7-9]。本文中,通过将平板装药与橡胶复合板集成设计,采用实验和数值模拟方法研究其作为面板或背板时对射流的防护性能和机理,并与钢面板的反应装甲进行对比,以期为新型反应装甲的结构设计提供参考。

1 实验研究

1.1 结构设计

为研究橡胶复合板位置对爆炸反应装甲防护性能的影响,设计了以橡胶复合板及钢面板作为面板或背板的 3 种反应装甲结构,如图 1 所示。其中橡胶复合板由两层 Q235 钢板(厚度为 1.2 mm)和硫化橡胶夹层(密度为 1.01 g/cm^3,厚度为 1.5 mm)组成,其长度为 150 mm,宽度为 50 mm。将钢板表面清洗干净并进行喷砂处理,用调配好的环氧树脂溶液将钢板和橡胶粘结,室温下固化。橡胶复合板的等效钢厚为(0.12×2×7.85+1.5×1.01)/7.85=2.55 mm;而爆炸反应装甲包覆板材为 Q235 钢,厚度为

* **收稿日期**:2015-12-21; **修回日期**:2016-06-02
第一作者:李如江(1978—),男,博士,副教授,lirujiang3002@sina.com。

2.5 mm，由此可知，3 种结构爆炸反应装甲面密度基本相同。夹层炸药采用厚度为 3 mm、装药密度为 1.71 g/cm^3 的 B 炸药。此外，图 1 中结构记号意义如下："St"表示钢板，"Rubber"表示硫化橡胶层，"E"表示夹层炸药。

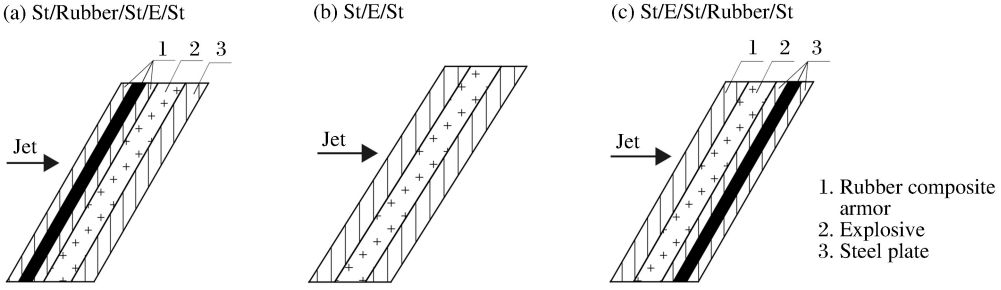

图 1 3 种反应装甲结构

Fig. 1 Three ERA structures

1.2 实验装置

采用装药口径 36 mm 聚四氟乙烯塑料壳体的聚能装药对反应装甲作引爆实验，其中铜药型罩壁厚为 1 mm，锥角为 60°，装药为 JH-2。该聚能装药射流头部速度约为 6.2 km/s，直径为 1.5 mm，炸高为 85 mm 时对均质装甲钢的平均穿深为 150 mm。

图 2 为聚能装药对反应装甲作用的实验布置示意图。实验时聚能装药呈水平放置，口部距测试装甲表面、后效靶板分别为 85、210 mm。反应装甲倾角 30°，后效靶材为 603 均质装甲钢，厚度为 50 mm，实验后通过测量残余穿深(depth of penetration, DOP)来比较 3 种装甲结构的防护性能，采用 Scandish Flash-XT450 脉冲 X 射线摄影系统对 3 种结构反应装甲与射流作用情况进行了观测。聚能装药采用电雷管起爆。

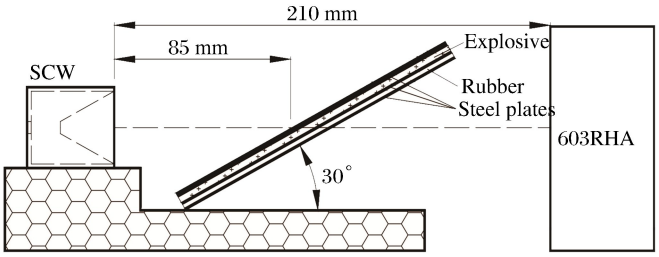

图 2 聚能装药对反应装甲作用的实验布置示意图

Fig. 2 Experimental scheme of shaped charge and ERA

1.3 实验结果

图 3 为脉冲 X 射线拍摄的射流与结构(b)和结构(c)作用时的典型时刻的 X 射线照片，图 4 为逃逸射流对靶板表面的损伤情况。表 1 为逃逸射流对靶板表面的损伤测量结果。从图 3 可以看出，射流发生了偏转，由于稀疏波的影响，飞板边缘速度略低于其它部分；结构(b)的飞板速度约为 860～880 m/s，背板与射流作用部位凸起现象不明显，而结构(c)背板与射流作用后呈花瓣形破裂，总体厚度明显大于钢飞板。在结构(c)背板前出现了逃逸射流颗粒，其长度约为 6 mm，速度约为 3 km/s。

从图 4 可以看出，射流与爆炸反应装甲作用后，在后效靶表面的损伤形成了多个开坑，由射流碎片高速撞击而成，大致可分为两个区域，一个是逃逸射流作用区(如图 4 中箭头所示)，另外一个区域是背板飞离射流轴线后，射流后部碎片侵彻后效靶形成。橡胶复合板无论作为面板和背板，都可以减小逃逸射流的穿深，作为背板时效果更优，与钢反应装甲相比，穿深降低了 46%。

从实验结果可以看出，橡胶复合板作为爆炸反应装甲面、背板时其防护性能优于钢反应装甲，特别是作为背板时后效穿深相比于钢反应装甲减小了 5 mm。



图 3 典型时刻的 X 射线实验照片

Fig. 3 X-ray photographs at $t=46\ \mu s$

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results of penetration

装甲结构	开坑尺寸/(mm×mm)	开坑深度/mm
结构(a)	7×11	9
结构(b)	6×11	11
结构(c)	6×7	6

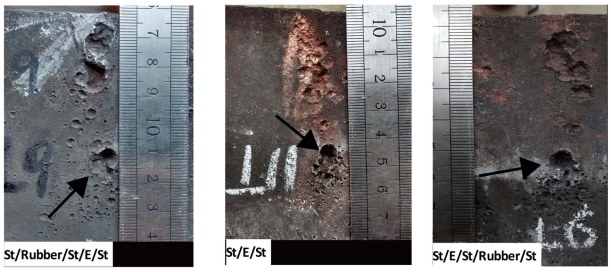

图 4 后效靶穿深实验结果照片

Fig. 4 Experimenal pictures of DOP results

2 数值模拟

2.1 计算模型

利用非线性动态有限元 ANSYS/LS-DYNA 软件 ALE 算法对聚能装药与反应装甲的作用过程进行了数值模拟，其中空气和聚能装药采用欧拉算法，反应装甲采用拉格朗日算法。根据结构的对称性，建立了 1/2 计算模型，建模过程中施加对称约束和无反射边界条件。

2.2 材料模型参数

JH-2 装药采用 JWL 状态方程和高能材料燃烧模型，夹层炸药 Comp. B 采用 JWL 状态方程和 Lee-Tarver 反应模型[10]描述，其表达式为：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\omega E/V \tag{1}$$

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

式中：$V=\rho_0/\rho$，ρ 为爆轰产物密度，ρ_0 为炸药初始装药密度；$E=\rho_0 e$，e 为内能；A、B、R_1、R_2、ω 为输入参数；λ 为反应速率分数；t 为时间，p 为压力，I、b、a、x、G_1、c、d、y、G_2、e、g、z 为常数。炸药的主要参数和 Lee-Tarver 反应模型参数分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 炸药计算参数

Table 2 Computational parameters for JH-2 and Comp. B

炸药	ρ/(g·cm^{-3})	D/(m·s^{-1})	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
JH-2	1.685	8 130	625.3	23.29	5.25	1.6	0.28
Comp. B	1.715	7 980	524.2	7.77	4.2	1.1	0.50

表 3 Lee-Tarver 反应模型参数

Table 3 Computational parameters for Lee-Tarver model

I /s^{-1}	b	a	x	G_1/GPa	c	d	y	G_2/GPa	e	g	z
4.4×10^{17}	0.667	0	20	310	0.667	0.111	1.0	400	0.333	1.0	2.0

紫铜药型罩和包覆板材料 Q235 钢板的力学行为分别采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneison 状态方程进行描述，材料的本构参数见表 4，其中 A_1、B_1、C_1、m、n 为 Johnson-Cook 模型参数，c_0 为体积声速，Γ_0 为 Grüneisen 系数，s 为常数。橡胶夹层和聚能壳体材料采用 Grüneison 状态方程和 Hydro(Pmin)模型描述[1]，材料参数取值见表 5，其中 σ_b 为抗拉强度，ε 为延伸率。

表 4 紫铜和 Q235 钢材料的本构方程计算参数

Table 4 Computational parameters for copper and Q235 steel

材料	ρ/(g·cm^{-3})	A_1/GPa	B_1/GPa	n	C_1	m	c_0/(km·s^{-1})	s	Γ_0
Q235	7.85	0.792	0.51	0.26	0.014	1.03	4.57	1.33	1.67
Cu	8.96	0.090	0.29	0.31	0.025	1.09	3.94	1.49	1.99

表 5 橡胶夹层和聚能壳体材料参数

Table 5 Computational parameters for rubber interlayer and polymer shell

材料	ρ/(g·cm^{-3})	c_0/(m·s^{-1})	s	Γ_0	σ_b/MPa	ε/%
橡胶	1.01	852	1.865	1.5	20	400
Teflon	2.15	1 680	1.82	0.59	30	450

3 数值模拟结果及分析

图 5 给出了射流与 3 种结构的反应装甲作用形态的数值模拟结果，其中 $t=46$ μs 的全对称模型的数值模拟结果与 X 射线照片结果符合较好，验证了模型和参数的正确性。当 $t=25$ μs 时，射流刚好穿透结构(a)橡胶复合装甲的背板，由于夹层的存在，射流头部在背板处发生了反射，此刻还未能引爆炸

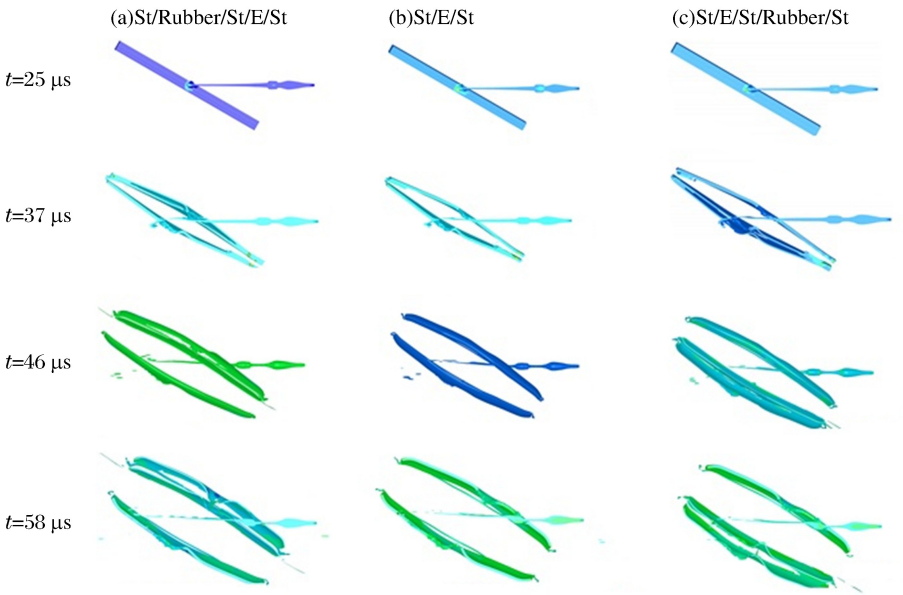

图 5 射流与 3 种结构的反应装甲在典型时刻的作用形态

Fig. 5 Results of interaction between jet and three structures of ERA at different times

药；对于结构(b)和结构(c)，射流则已穿透面板，并引爆了夹层装药。钢板在冲击波和爆炸产物驱动作用下反向运动，后续射流在爆轰波的作用下局部产生了向上的弯曲。当 $t=37\mu s$ 时，射流头部穿透了背板，形成了逃逸射流，结构(b)最长，结构(a)次之，结构(c)最短，这是由于射流在侵彻结构(c)的背板时头部在复合层产生了反射，同时由于结构(c)的背板在运动过程中存在间隙，逃逸射流的后部与背板作用后会“挤入”间隙，因而逃逸射流长度最短。逃逸射流后部与结构(a)和结构(b)的背板作用后，会沿飞板孔壁接触面发生“滑移”，仍然可以逃逸。逃逸射流断裂后形成的颗粒在运动过程中长度发生改变、速度降低，最终 3 种结构的最长逃逸射流颗粒在触靶前运动速度分别为 2.65、2.71 和 3.10 km/s，长度分别为 8.5、12.0 和 6.5 mm。当 $t=58\ \mu s$ 时，橡胶复合装甲两板之间的距离更加明显，射流后部经面板干扰后的偏折角无明显差别，当背板进一步飞离射流运动轴线后，就会失去对射流的作用，在后效靶表面的形成另一个损伤区域。

图 6 为飞板的运动速度(v_p)的计算结果，其中“F”和“B”分别表示面板和背板，“F-B”表示结构面板的背板(此时结构的面板为复合板)，前一个字母是相对于结构整体而言，后一个字母则是相对于复合板而言。由图 6 可知，结构(b)钢面板和背板速度曲线基本相同，经过约 4 μs 的加速过程速度趋于平稳，终了速度为 900 m/s。结构(a)和结构(c)钢板的加速历程基本相同，只是方向相反，钢飞板的终了速度约为 920 m/s，而橡胶复合板的运动加速过程较复杂，与炸药相邻的钢板(内层板)存在着一个剧烈震荡过程，平均速度约为 880 m/s；而外层钢板加速过程比较平稳，终了速度为 1050 m/s。橡胶复合板内、外层具有较大的速度差，其原因可能是炸药爆炸后在内层钢板中产生了较强的冲击波向橡胶层以及外层钢板传播，由于橡胶可压缩性较小，可作为良好的传压介质将冲击波传递给外层板，冲击波经外层板表面反射后产生拉伸波，拉伸波到达外层钢板与橡胶界面时由于不能承受拉应力而产生了“层裂”效应，使外层钢板获得了更高的速度，使逃逸射流长度减少，增加了其防护性能。

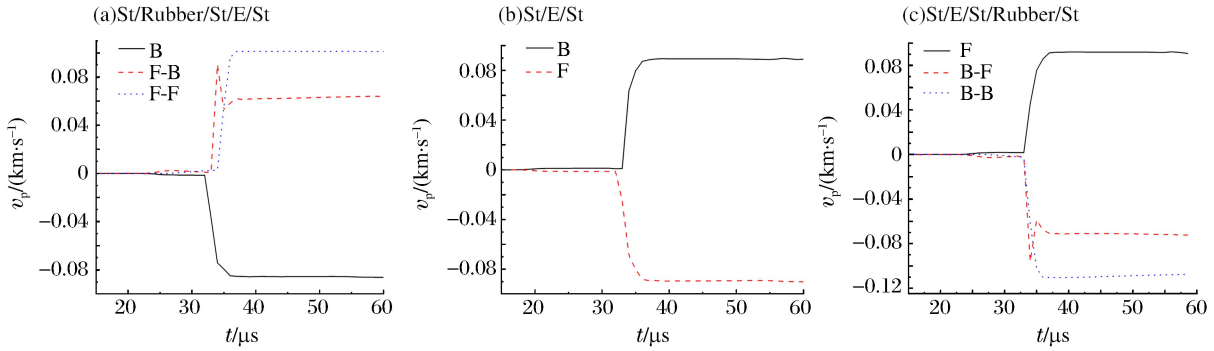

图 6　飞板速度计算结果

Fig. 6　Calculated plate velocities

4　结　论

(1) 面密度基本相同条件下，复合板作为面板或背板的反应装甲防护性能优于钢反应装甲，其中橡胶复合板作为反应装甲背板时，防护性能最优。

(2) 爆炸驱动下橡胶复合板的外层钢板具有更高的速度，相比于钢反应装甲飞板提高约 16%。

(3) 橡胶复合板界面效应和橡胶复合飞板的间隙可有效减小逃逸射流的长度。

参考文献：

[1]　黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京：北京理工大学出版社，2014.
Huang Zhengxiang. Theory and practice of shaped charge[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.

[2]　Thoma K, Vinckier D, Kiermeir J, et al. Shaped charge jet interaction with highly effective passive sandwich sys-

tems-experiments and analysis[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1993,18(5):275-281.

[3] Mayseless M, Marmor E, Gov N S, et al. Interaction of a shaped charge jet with reactive or passive cassettes[C]// 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada, 1993:439-448.

[4] 赵慧英,沈兆武,刘天生.反应装甲与陶瓷复合装甲集成技术研究探讨[J].爆炸与冲击,2006,26(1):21-26.
Zhao Huiying, Shen Zhaowu, Liu Tiansheng. On the integrated technology of reactive armors with composite ceramic armors[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(1):21-26.

[5] Lee H J, Choi J H, Lee C H, et al. The effective analysis of backup plates of explosive reactive armor[C]// 28th International Symposium on Ballistics. Atlanta, GA, 2014:988-995.

[6] Friling S, Benyami M, Yaziv D. The interaction O shaped charge jets with combined reactive-inert cassettes[C]// 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada, 1993:227-235.

[7] Jia X, Huang Z X, Zu X D, et al. Theoretical analysis of the disturbance of shaped charge jet penetrating a woven fabric rubber composite armor[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014,65(2):69-78.

[8] Jia X, Huang Z X, Zu X D, et al. Experimental study on the performance of woven fabric rubber composite armor subjected to shaped charge jet impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013,57(7):134-144.

[9] Zu X, Huang Z, Jia X. Study on rubber composite armor anti-shaped charge jet penetration[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013,38(5):695-702.

[10] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980,23(12):2362-2372.

[11] Li X D, Yang Y S, Lü S T. A numerical study on the disturbance of explosive reactive armors to jet penetration [J]. Defence Technology, 2014,10(1):66-75.

[12] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[DB]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001.

Protective performance of explosive reactive armor with composite rubber armor as front or back plate

Li Rujiang[1], Chai Yanjun[1], Han Hongwei[2], Liu Tiansheng[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 Armament Industry, Yantai* 264003, *Shandong*, *China*)

Abstract: The protection performance and mechanism of explosive reactive armors (ERA) with composite rubber armor as its front or back plate were investigated using experiments and numerical simulation, and the results were examined in comparison with ERA using conventional steel plates of the same area density. The experimental results show that the protection performance of ERA with composite rubber armor as the front or back plates are superior to that of the ERA with steel plates, and the optimal performance is achieved when the rubber composite armor is used as the back plate. The numerical simulation results show that the back plate velocity of the composite rubber armor is 16% higher than that of the ERA with steel plates, the space between the two moving plates of the composite rubber armor and the boundary effect contribute significantly to reducing the length of the escaping shaped charge jet.

Keywords: explosive reactive armors (ERA); shaped charge; protection performance

(责任编辑 王玉锋)