文章编号：1000-5773(2012)05-0551-06

橡胶夹层厚度对复合靶板抗射流侵彻性能的影响*

祖旭东，黄正祥，贾 鑫，肖强强

（南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室，江苏南京 210094）

摘要：通过分析应力波在橡胶复合靶板中的传播特性，研究了复合靶板上各层质点速度在应力波作用下的变化情况，分析了应力波在橡胶复合靶板对射流干扰中的作用，结合射流在空气中的断裂模型，提出了射流在复合靶影响下的断裂模型；分析了橡胶夹层厚度对复合靶板抗射流侵彻性能的影响；通过脉冲 X 光照相技术和穿深实验，研究了橡胶夹层厚度不同时，在射流以 68°倾角侵彻下，橡胶复合靶板对 56 mm 口径基准成型装药射流的干扰情况及射流的剩余侵彻能力。研究结果表明：理论分析与实验结果相吻合；橡胶复合靶板对射流有很好的干扰作用；在满足结构效应的情况下，随着天然橡胶夹层厚度的增加，应力波对射流的干扰能力降低，射流的变形程度减小，复合靶板的防护能力降低。

关键词：冲击力学；橡胶复合靶；抗侵彻性能；橡胶夹层

中图分类号：O358；TJ413 **文献标识码**：A

1 引 言

随着大威力精确反装甲弹药的发展，发现和毁伤装甲目标的概率明显增加，装甲防护在与反装甲弹药的对抗中，已处于劣势地位。在严峻的威胁环境下，由于受到体积、重量、机动性等诸多条件的限制，仅靠增加装甲厚度的被动防护手段，已难以保证装甲目标的战场生存能力和持续作战能力，因此装甲目标必将朝着轻量化和高机动性方向发展。研究轻质、高效的新型防护装甲（包括材料和结构）是世界各国的重点研究方向[1]。橡胶基复合材料具有密度低、比强度和比模量高、断裂安全性好、可设计性强和制作工艺良好等优点，特别是橡胶复合装甲对成型装药射流具有良好的干扰作用，可以使侵彻过橡胶复合靶板的成型装药射流出现明显的弯曲变形和断裂，因而在坦克、步兵战车和舰船等防护领域得到了广泛的应用。而橡胶基复合靶板抗射流侵彻的机理十分复杂，国内外相关的研究主要集中在橡胶复合材料抗枪弹侵彻方面[2-4]，而在抗射流侵彻方面，只有瑞典的 Helte 等人[5]将橡胶基复合装甲中的橡胶作为一种惰性炸药，通过爆炸反应装甲对射流的干扰机理分析了橡胶基复合装甲对射流的干扰原理。本研究通过分析射流侵彻橡胶复合靶时产生的冲击波对复合靶板形变的影响，阐明复合靶板对射流的干扰作用和橡胶夹层厚度对复合靶抗射流侵彻性能的影响，并通过标准聚能装药侵彻橡胶基复合靶的实验研究，证明理论分析的正确性。

* **收稿日期**：2010-10-18；**修回日期**：2011-02-28

基金项目：国家自然科学基金（11072115）

作者简介：祖旭东（1983—），男，博士，讲师，主要从事高效毁伤与防护技术研究. E-mail：zuxudong9902@yahoo.com.cn

通讯作者：黄正祥（1967—），男，博士，教授，主要从事高效毁伤与防护技术研究. E-mail：huangyu@mail.njust.edu.cn

2 橡胶复合靶抗射流侵彻作用机理

2.1 弹靶参数及靶板设置情况

通过讨论应力波在射流侵彻复合靶时对复合靶的作用，分析射流以 68°倾角侵彻橡胶复合靶时，橡胶复合靶抗射流侵彻的作用机理。图 1 为成型装药侵彻复合靶的示意图。

成型装药如图 2 所示。采用标准锥形聚能药型罩，装药为 JH-2 炸药，药量为 203 g，药形罩材料为紫铜，药型罩直径为 56 mm，药型罩壁厚为0.8 mm。炸高为 80 mm 时，药型罩聚能射流侵彻 45 钢钢锭的平均穿深为 181 mm。复合靶板结构如图 3 所示，“三明治”结构的橡胶基复合靶板夹层为天然橡胶(6744 橡胶)，面板和背板的尺寸均为250 mm×150 mm×3 mm，橡胶夹层的厚度 h 是变化的。

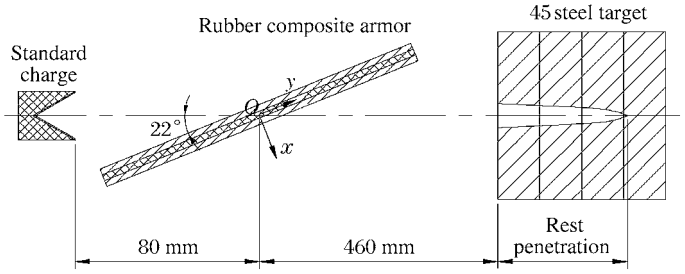


图 1 射流与复合靶的关系

Fig 1 Sketch of the experimental and simulation set-up



图 2 标准聚能装药

Fig 2 Standard shaped charge

表 1 为标准成型装药下 JH-2 炸药的 C-J 参数，其中 $\rho_{JH\text{-}2}$ 为 JH-2 炸药的密度，D 为爆速，e_0 为 JH-2 初始比动能，p_{CJ} 为爆轰压力，A、B、ω、R_1 及 R_2 为常数；表 2 为 45 钢和高导无氧铜(OFHC)的材料性能参数，其中 ρ 为材料密度，c 为材料声速，S_1 为与材料性质有关的常数，γ_0 为 Grüneisen 常数；表 3 为橡胶的性能参数，其中 ρ_r 为橡胶的密度，c_r 为橡胶中的声速，H_{SA}为材料邵氏硬度，S_s 为拉伸强度，S_t 为抗撕强度，ε_f 为扯断伸长率，ε_s 为扯断永久变形。

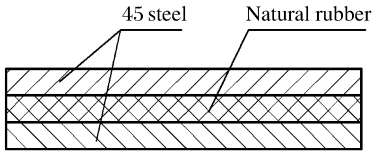


图 3 天然橡胶复合靶结构示意图

Fig 3 Sketch of the composite armor

表 1 JH-2 炸药的 C-J 参数

Table 1 C-J parameters of explosive JH-2

$\rho_{JH\text{-}2}$/(kg/m^3)	D/(m/s)	e_0/(GJ/m^3)	p_{CJ}/(GPa)	A/(GPa)	B/(TPa)	ω	R_1	R_2
1 720	8 425	10.2	30.4	852.4	1.802	0.38	4.6	1.3

表 2 高导无氧铜和 45 钢的材料参数

Table 2 Parameters of OFHC and 45 steel

Material	ρ/(kg/m^3)	c/(m/s)	S_1	γ_0
45 steel	7 830	4 569	1.33	2.17
OFHC	8 930	3 940	1.489	1.99

表 3 橡胶性能参数

Table 3 Performance parameters of the rubber

ρ_r /(kg/m^3)	c_r /(m/s)	H_{SA}	S_s /(MPa)	S_t /(kN/m)	ε_f /(%)	ε_s /(%)
950～1 050	340	75	20	55	400	30

2.2 应力波对橡胶复合靶板抗射流侵彻性能的影响

2.2.1 应力波对橡胶复合靶板内物质质点速度的影响

图 4 为成型装药射流侵彻橡胶复合靶板的示意图。射流侵彻复合靶板产生的应力波传播情况非常复杂，为了便于研究，假设射流侵彻复合靶时产生的应力波是以撞击点为圆心的球面波。球面波在两介质界面上发生的反射、折射和透射非常复杂，而分界面为平面，因此可以把球面波假设为平面波，利用平

面波来研究球面波[8]。

当射流侵彻复合靶板开坑时,根据伯努利方程可得橡胶复合靶板面板上物质点的速度为

$$u_1 = \frac{v_j}{1+\sqrt{\rho_p/\rho_j}} \tag{1}$$

式中:v_j为射流速度,此处取射流头部速度,根据脉冲 X 光实验可得 $v_j \approx 6\,300$ m/s;ρ_p、ρ_j 分别为钢板和射流的密度。代入数值计算可得 $u_1 \approx 3\,253$ m/s。

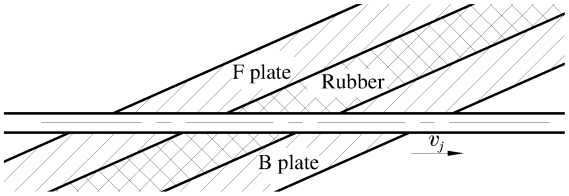


图 4　成型装药射流侵彻橡胶复合靶板示意图

Fig 4　Sketch of the shaped charge jet penetrating the rubber composite armor

橡胶复合靶板很薄,因此射流头部从复合靶板面板(F Plate)侵彻到背板(B Plate)的过程中,射流的侵彻速度 u 可取恒值 u_1。经计算可得成型装药射流穿过复合靶板的时间约为 7.4 μs,而应力波穿透橡胶复合靶面板和橡胶夹层(橡胶夹层厚度取实验中的最小值 2 mm)的时间约为 18 μs。因此射流穿过橡胶复合靶时,射流与面板作用产生的应力波仍未传播到背板。射流侵彻橡胶复合靶背板时仍产生应力波,应力波的卸载作用造成背板上出现较大的撕裂孔。

射流侵彻复合靶板面板时产生压缩波,压缩波通过橡胶夹层到达背板,但是由于背板变形剧烈,开孔较大,导致应力波传播到橡胶层与背板原接触面时,直接发生卸载,因此射流与面板作用产生的应力波不会对射流变形及断裂产生影响,因此可以忽略射流侵彻橡胶复合靶板的面板产生的应力波对射流的干扰作用。射流与橡胶夹层材料相互作用时产生的应力波也会由于反射作用通过橡胶材料与射流发生作用,但是由于橡胶材料本身的强度和密度较小,因此这部分应力波对射流的干扰作用可以忽略。而射流侵彻橡胶复合靶板背板时,射流与背板作用产生的应力波通过橡胶夹层,然后在面板与橡胶夹层界面上发生反射,反射波通过橡胶夹层,经透射传入背板,通过背板上的质点运动作用到射流上,影响射流的稳定性。因此主要考虑射流与背板作用时产生的应力波在复合靶板中的传播及作用。

根据应力波原理,透射波系数(T)和反射波系数(F)分别为

$$T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \tag{2}$$

$$F = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \tag{3}$$

式中:ρ_1、ρ_2 分别为应力波入射材料和透射材料的密度;c_1、c_2 分别为应力波入射材料和透射材料的声速。

橡胶属于粘弹性材料,由于粘性效应,应力波的衰减可以用复指数函数 $e^{-\gamma x}$ 表示,其中 $\gamma=\gamma(\omega)$,为材料的传播系数,可由实验测定[6-7]。而 45 钢中应力波的衰减系数很小,与橡胶材料相比可以忽略不计,因此忽略应力波在钢中的衰减。根据费马原理,应力波沿着所需时间最短的路径传播。计算可得,当射流与背板作用产生的应力波通过一系列的反射和透射后与射流作用时,背板上与射流作用处质点的速度为

$$u_e = \left[\frac{4(\rho_p c_p - \rho_r c_r)\rho_p c_p \rho_r c_r}{(\rho_p c_p + \rho_r c_r)^3} e^{-2\gamma h}\right] \cdot u \tag{4}$$

式中:c_p为复合靶面板和背板中的声速。根据(4)式可知,当橡胶及靶板材料确定以后,对射流产生干扰的背板上物质点的质点速度仅与橡胶夹层的厚度和射流与背板作用所产生的质点速度有关。橡胶夹层厚度为 h_1 和 h_2 时,背板与射流作用位置处的质点速度分别为 u_{e1} 和 u_{e2},则 $u_{e1}/u_{e2} = e^{2\gamma(h_2-h_1)}$,因此随着橡胶夹层厚度的增加,橡胶复合靶板背板上的质点速度呈复指数减小,复合靶板对射流的干扰强度降低,射流产生的变形减小,射流的剩余侵彻能力增加。

2.2.2　射流在橡胶复合靶板中应力波干扰作用下的断裂模型

射流在空气中的变形为自由拉伸过程,属于大变形问题,可以忽略大气压力、应变率及外部环境的干扰,即射流处于单向应力状态。由于射流在拉伸过程中材料处于流动状态,因此在计算过程中射流微元在空气中受到的力 σ_a 可看作常值。射流通过橡胶复合靶板时,背板物质在应力波作用下与射流发生

作用，使射流受到侧向力，这是射流失稳变形和出现断裂的主要因素。

根据伯努利方程可得射流侵彻背板时产生的应力波强度为

$$\sigma = \frac{1}{2}\rho_j (v_j - u)^2 \tag{5}$$

由应力波对复合靶板内质点速度的影响可知，经一系列透射和反射后，橡胶复合靶背板上与射流作用处的应力为

$$\sigma_b = \left[\frac{4(\rho_p c_p - \rho_r c_r)\rho_p c_p \rho_r c_r}{(\rho_p c_p + \rho_r c_r)^3} e^{-2\gamma h}\right] \cdot \sigma \tag{6}$$

背板与射流相互作用时，射流微元所受到的应力表达式为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_a + \sigma_b \sin 68^\circ \\ \sigma_2 = -\sigma_b \cos 68^\circ \\ \sigma_3 = 0 \end{cases} \tag{7}$$

图 5 为射流的应力状态示意图。

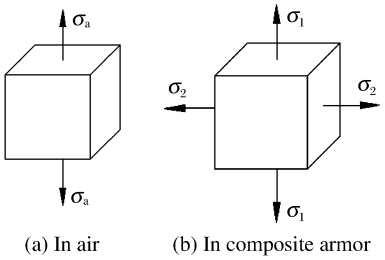


图 5 射流微元的应力状态

Fig 5 Stress condition of the jet micro-unit

在复杂应力状态下，根据 Mises 强度理论模型计算射流受到的等效应力为

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2}} \tag{8}$$

根据文献[8]可知，射流断裂时间为

$$t_b = c(\varphi) \sqrt[3]{\frac{\Omega \rho_j}{\sigma_a}} \tag{9}$$

式中：$c(\varphi)$为与射流材料断面收缩率 φ 有关的常数，由实验确定；Ω 是射流速度的函数，对于固定速度的射流微元来说，Ω 可以当作常数考虑[8]。

将(7)式、(8)式带入(9)式，得到射流在橡胶复合靶中的断裂模型公式

$$t_b = c(\varphi)\left(\frac{\sqrt{2}\Omega\rho_j}{\sqrt{3\sigma_a^2 + 3\sigma_b^2 + 6\sigma_a\sigma_b \sin^2 68^\circ + 2\sigma_a\sigma_b^2 \sin 68^\circ \cos 68^\circ}}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{10}$$

根据(6)式可知，随着橡胶夹层厚度的增加，σ_b 减小，射流断裂时间增加。随着橡胶厚度的增加，射流侵彻橡胶复合靶板后相同时间内射流发生断裂的情况减少，射流剩余侵彻能力增加，橡胶复合靶的防护能力降低。因此，在满足结构要求的情况下，橡胶夹层厚度应取最小值。

3 变橡胶夹层厚度的橡胶基复合靶抗射流侵彻实验研究

橡胶复合靶对射流的侵彻能力有很大影响。射流侵彻复合靶后发生明显的变形与断裂，射流继续侵彻的能力降低。本实验研究在 68°倾角情况下，天然橡胶夹层厚度变化时复合靶板抗射流侵彻能力的变化情况。利用脉冲 X 光照相技术观察射流断裂及变形情况，通过穿深实验，测量射流侵彻复合靶板后射流的继续侵彻能力，实验布局情况如图 6 所示。



图 6 复合靶抗射流侵彻实验布局图

Fig 6 Experimental layout diagram

成型装药起爆后 75 μs 时，射流侵彻橡胶复合靶后，靶板变形、射流断裂情况如图 7 所示。复合靶板夹层厚度(h)为 2、3 和 4 mm 时，射流的剩余穿深分别为 20、35 和 40 mm。图 8 为射流侵彻橡胶夹层厚度为 3 mm 的复合靶，橡胶复合靶板面板和背板的变形情况。

分析图 7 所示的射流侵彻复合靶板后射流断裂情况的 X 光照片、剩余穿深和图 8 所示的射流侵彻

后橡胶复合靶面板和背板的变形可知,橡胶复合靶对射流有明显的干扰作用。射流侵彻橡胶复合靶时,橡胶复合靶的背板产生大变形,与射流形成相对切割,干扰射流的稳定性,使射流侵彻橡胶复合靶后,出现弯曲变形和断裂。随着复合靶橡胶夹层厚度的增加,射流出现的弯曲变形程度降低,即射流的分散度降低,同时射流断裂的程度降低,因此射流的剩余侵彻能力增加,剩余穿深增加。与理论分析结果一致。根据图 4 中弹靶作用位置可知,橡胶复合靶板背板上的质点运动方向为垂直于靶板法线沿背板方向,与实验结果中射流弯曲方向一致。因此,通过分析应力波在橡胶复合靶板中的运动情况,可以得到橡胶复合靶板对射流的干扰作用机理。由于橡胶夹层具有吸波效果,橡胶夹层厚度较小时,应力波通过橡胶夹层后衰减较小,对靶板变形的影响较大,因此橡胶夹层较薄时复合靶板对射流的影响较大。

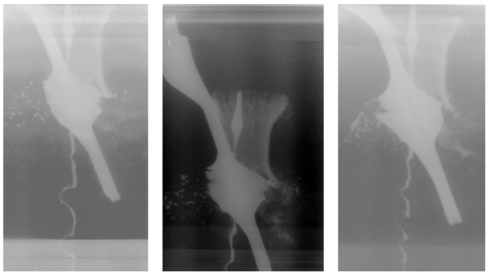


图 7　射流断裂情况

Fig 7　Fracture of the jet

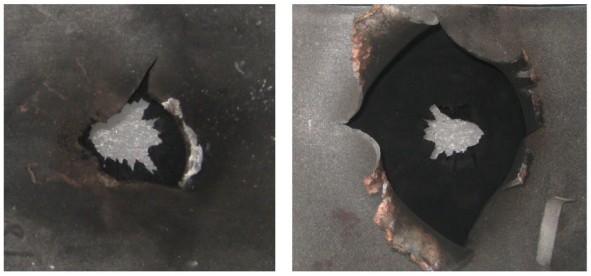


图 8　射流侵彻复合靶后面板和背板的变形情况

Fig 8　Deformation of the penetrated plate

4　结　论

通过脉冲 X 光摄影技术和穿深实验,研究了不同厚度天然橡胶夹层的复合靶抗射流侵彻性能,通过分析应力波在橡胶复合靶中的传播及复合靶板与射流的相互作用情况,研究了橡胶夹层厚度对复合靶板抗射流侵彻性能的影响。通过实验及分析得到以下结论:

(1) 橡胶夹层的存在使得复合靶的背板与射流发生相对切割作用,影响射流的一致性与稳定性,导致射流侵彻复合靶板后发生严重的断裂及变形,增强了复合靶板抗射流侵彻的能力,降低了射流的继续侵彻能力;

(2) 随着橡胶复合靶内橡胶夹层厚度的增加,射流侵彻橡胶复合靶后变形程度降低,射流断裂需要的时间变长,即橡胶夹层越厚,射流侵彻复合靶出现断裂所需要的时间越长,使得橡胶复合靶的空间防护能力降低,橡胶基复合靶抗射流侵彻性能降低,作为防护装甲,在满足结构要求的情况下,橡胶夹层材料的厚度应取最小值;

(3) 以橡胶材料作为夹层的橡胶复合靶具有优异的抗射流侵彻能力,可作为一种新型复合装甲。

References:

[1] Zhang Z Q, Zhao B R, Zhang R S, et al. Basis of Armor Technology [M]. Beijing: Ordance Industry Press, 2000.
张自强,赵宝荣,张瑞生,等. 装甲防护技术基础 [M]. 北京:兵器工业出版社,2000.

[2] Colakoglu M, Soykasap O, Özek T. Experimental and numerical investigations on the ballistic performance of polymer matrix composites used in armor design [J]. Appl Compos Mater, 2007, 14(1): 47-58.

[3] Larsson F, Svensson L. Carbon, polyethylene and PBO hybrid fibre composites for structural lightweight armour [J]. Compos Part A: Appl Sci Manuf, 2002, 33(2): 221-231.

[4] Horsfall I, Petrou E, Champion S M. Shaped charge attack of spaced and composite armour [A]//23rd International Symposium on Ballistics Tarragona [C]. Spain, 2007: 1281-1288.

[5] Helte A, Lidén E. The role of Kelvin-Helmholtz instabilities on shaped charge jet interaction with reactive armours

plates [A]//25th International Symposium on Ballistics [C]. Beijing, 2010: 1347-1350.

[6] Liu X M, Hu S S, Chen Z. The wave propagation attenuation and dispersion in a viscoelastic Hopkinson pressure bar [J]. Acra Mechanica Solida Sinica, 2002, 23(1): 81-86. (in Chinese)
刘孝敏, 胡时胜, 陈 智. 粘弹性 Hopkinson 压杆中波的衰减和弥散 [J]. 固体力学学报, 2002, 23(1): 81-86.

[7] Cui X Z, Li W M, Duan Z P, et al. Stress wave attennation in isotropic damaged rocks [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 76-80. (in Chinese)
崔新壮, 李卫民, 段祝平, 等. 爆炸应力波在各向同性损伤岩石中的衰减规律研究 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 76-80.

[8] Zheng Z M. Stability of jet produced by shaped charge [J]. Explosion and Shock Waves, 1981, 1(1): 6-17.
郑哲敏. 聚能射流的稳定性问题 [J]. 爆炸与冲击, 1981, 1(1): 6-17.

Effects of Composite Armor with Different Rubber Sandwich Thickness against the Shaped Charge Jet Penetration

ZU Xu-Dong, HUANG Zheng-Xiang, JIA Xin, XIAO Qiang-Qiang

(*ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: The particle velocity of the rubber composite armor and the mechanism of the armor interfering with the shaped charge jet were studied by analyzing the wave propagation rules in the armor. The fracture model of shaped charge jet affected by the rubber composite armor was put forward based on the jet fracture model in the air. The effect of the armor thickness on the jet fracture was also analyzed. The theoretical conclusion was proved by the X-ray and DOP (Depth of Penetration) experiments of ∅56 mm standard shaped charge jet penetrating the rubber composite armor with difference rubber thickness at the angle of 68°. The results show that the rubber composite armor can disturb the shaped charge jet effectively and the protection capability reduces with the increasing of the natural rubber thickness while the thickness satisfied the structure effect.

Key words: impact mechanics; rubber composite target; anti-penetration property; rubber sandwich