

聚脲涂层复合结构抗侵彻机理实验研究

高照, 李永清, 侯海量, 李茂, 朱锡

(海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为研究聚脲涂层复合靶板的抗侵彻性能, 利用球形弹丸开展了相近面密度下的钢质靶板与喷涂聚脲涂层复合结构的弹道冲击实验, 得到了钢靶与采用不同涂覆方式制备的聚脲涂层复合结构的抗侵彻性能, 分析了失效模式和吸能机理。结果表明: 冲击过程中, 前聚脲涂层能有效缓冲弹体与钢靶之间的撞击载荷, 使钢靶产生预变形, 降低弹体的相对侵彻速度, 延缓钢靶绝热剪切破坏的发生, 提高复合结构的弹道极限; 后聚脲涂层可与钢靶协调变形, 形成冲塞质量块吸能, 吸收弹体动能, 在弹速较高时有较好的吸能能力。

关键词: 聚脲涂层复合结构; 侵彻机理; 弹道极限; 吸能

中图分类号: O385; O347.1

文献标识码: A

随着半穿甲导弹等毁伤武器的广泛应用, 抵御战斗部近炸产生的冲击波、高速破片等多种载荷的联合作用已成为舰船防护结构的重要研究方向。舰船防护结构朝着强韧化、轻量化、多功能化、高效化方向发展, 传统的均质钢装甲越来越多地被多层复合结构所代替, 各种高性能复合材料被广泛应用于防护领域。聚脲具有成本低、质量轻、耐火、耐磨、吸收冲击能等优点, 吸引了国内外学者的广泛关注^[1-3], 成为防护领域的研究焦点。将聚脲材料喷涂于钢结构上, 形成聚脲涂层复合结构, 以提高结构在冲击载荷下的动态断裂抗力和能量吸收能力, 这是聚脲在防护领域的主要应用形式和目的^[4]。实验表明^[5-7], 聚脲弹性体材料呈现很强的应变率相关性, 低应变率下表现为类橡胶行为, 高应变率下转变为类玻璃行为, 该转变与不同应变率下的玻璃化转变温度(T_g)一致。随着应变率的增加, 聚脲材料的强度和刚度增加, 同时破坏应变减小。聚脲材料的耗能机制主要有两种解释: 一种是聚脲材料具有较好的黏弹性, 另一种是压力和应变诱导的从橡胶态到玻璃态的转变。甘云丹等^[8]通过数值模拟方法, 研究了弹性体涂覆钢板在不同水下爆炸载荷作用下的抗爆能力, 发现涂覆聚脲弹性体的钢板的抗爆能力提高约20%。宋彬等^[9]应用有限元软件分析了有无聚脲夹层的抗爆罐的抗爆能力, 结果表明, 聚脲弹性体夹层结构的抗爆性能优于无夹层结构, 且冲击波在聚脲弹性体传播过程中有较大幅度的衰减。

半穿甲导弹侵彻舰船舷侧时, 战斗部爆炸会产生冲击波和高速破片, 对于重要舱室的防护不仅需要舱壁防护结构抵御冲击波的影响, 同时也需要抵抗破片的穿甲。然而, 国内外对于聚脲复合防护结构的研究主要集中在抗爆性能, 抗侵彻性能研究较少。为此, 本工作针对不同喷涂方式和喷涂厚度的聚脲涂层复合装甲结构模型, 对其在高速弹丸冲击下的抗侵彻性能开展试验研究, 分析靶板破坏模式和破坏机理, 以期聚脲涂层复合结构设计提供参考。

1 弹道侵彻实验

实验在火药推进的滑膛弹道枪系统上进行, 滑膛枪的口径为14.5 mm, 弹体的初始速度由装药量决定。为保证发射所必需的密封性、速度要求以及弹体的运动轨迹, 弹体采用三瓣式铝合金弹托包覆, 破

* 收稿日期: 2018-08-22; 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51479204, 51679246)

作者简介: 高照(1993—), 女, 硕士, 主要从事船舶结构力学研究. E-mail: gaozhao8686@163.com

通信作者: 李永清(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事船舶结构力学研究.

E-mail: liyongqing@126.com

片出膛后通过弹托回收器分离弹托。利用激光测速系统测量弹体的初始速度 v_i 和剩余速度 v_r 。

实验采用直径为 10 mm 的球形弹, 弹体材料为 304 不锈钢。靶板材料为 Q235 钢, 分别设计单一钢板(S)以及钢板一侧喷涂聚脲弹性层(PU)的复合靶板, 靶板尺寸为 400 mm × 400 mm × 4 mm, 工况设计见图 1 和表 1, 其中 ρ_t 为靶板面密度。弹体和靶板的力学参数见表 2, 其中 ρ 为密度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, σ_y 为屈服应力, σ_b 为抗拉强度, δ_s 为拉伸率。

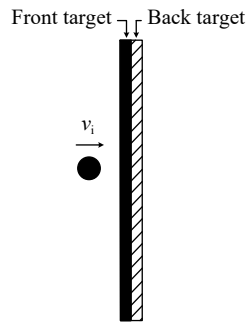


图 1 靶板结构
Fig. 1 Structure of the target

表 1 复合靶板结构
Table 1 Composite target structure

Case	Front target	Back target	$\rho_t/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$
1	4.0 mm steel		31.2
2	4.9 mm steel		39.0
3	4 mm steel	4 mm polyurea	35.28
4	4 mm polyurea	4 mm steel	35.28
5	4 mm steel	8 mm polyurea	39.36
6	8 mm polyurea	4 mm steel	39.36

表 2 材料参数
Table 2 Material parameters

Material	E/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	ν	σ_y/MPa	σ_b/MPa	$\delta_s/\%$
304 steel	220	7930	0.3	280		
Q235 steel	210	7850	0.3	235	400–490	22
Polyurea	0.23	1020	0.4	14		162

2 实验结果

共进行 38 发有效实验, 获得了 6 种工况下弹体的初始速度和剩余速度, 如表 3 所示。

3 实验现象及分析

3.1 变形破坏模式分析

弹体以初速 v_i 撞击复合结构靶板, 弹体与靶板内部均产生压缩波。弹体内部的压缩波由头部向弹体尾部传播, 靶板内部的压缩波由迎弹面向背弹面传播。由于弹体和钢质靶板中弹性压缩波速度约为 5 km/s, 聚脲材料中压缩波速度约为 0.5 km/s, 前聚脲涂层和后聚脲涂层呈现明显不同的抗弹特性, 导致弹体和靶板不同的破坏模式。

如图 2(a) 所示, 工况 1 中, 弹体撞击单一钢板, 弹体发生墩粗变形, 产生塞块, 弹靶接触区产生局部高温, 导致弹体与靶板粘在一起。工况 5 中, 见图 2(b), 聚脲涂层喷涂于钢靶板后表面, 由于聚脲涂层相对于靶板的支撑力较小, 因此此时的弹体变形与弹体侵彻单一钢板相似。而在工况 6 中, 聚脲涂层涂覆于钢靶板前侧, 聚脲作为弹性体, 对弹体侵彻靶板起缓冲作用, 由于初始弹速大于聚脲涂层中的压缩波速, 压缩波强度在聚脲涂层中较小, 因此弹体墩粗变形量明显小于单纯的钢靶以及涂覆于背弹面的聚脲复合结构, 见图 2(c)。当压缩波传至聚脲/钢界面时, 弹速在一定程度上减小, 降低了弹靶相对速度, 由于聚脲涂层的变形区域较大, 增加了弹靶接触面积, 从而使弹体冲击靶板时靶板的变形较小。

弹体侵彻下, 靶板失效的主要模式有穿孔破坏和整体结构变形, 失效模式与弹体速度、靶板厚度和靶板材料性能相关。单一钢板的失效模式主要有花瓣开裂、绝热剪切、剪切冲塞、延性扩孔等^[10–11], 球形弹垂直侵彻单一钢靶板的典型毁伤形貌如图 3 所示。

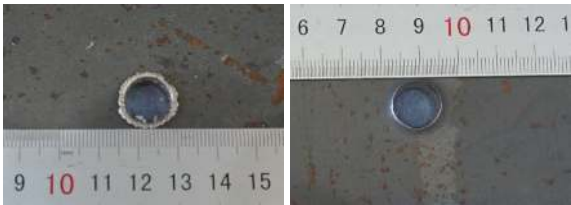
表 3 弹体侵彻实验结果
Table 3 Experimental results of ballistic experiments

Case	Target	$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_r/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Case	Target	$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_r/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	4.0 mm S	657.132	287.697	4	4 mm PU+4 mm S	674.603	291.320
		726.341	325.858			684.105	300.965
		805.802	380.740			727.896	331.513
2	4.9 mm S	561.149	58.816			829.876	386.320
		633.029	123.925	5	4 mm S+8 mm PU	514.000	0
		636.623	126.146			528.032	0
		693.878	191.269			559.303	45.332
		750.718	224.830			588.337	134.878
		801.509	256.178			607.577	140.267
		803.743	254.149			608.664	143.430
3	4 mm S+4 mm PU	511.355	0			688.817	218.776
		516.010	0			713.386	202.670
		562.262	148.966			790.514	275.192
		629.513	213.340			825.644	298.980
		674.469	235.001	6	8 mm PU+4 mm S	564.503	0
		767.494	292.222			625.805	186.506
		809.331	357.143			657.005	239.808
4	4 mm PU+4 mm S	860.977	370.330			756.396	317.757
		561.327	146.199			776.610	332.811

Note: Steel and polyurea are represented by S and PU respectively.



图 2 弹体变形破坏形貌



(a) Front surface of the target (b) Back surface of the target
图 3 钢板的典型破坏模式(工况 1, $v_i=726.341\text{ m/s}$)

Fig. 2 Deformation and failure morphology of projectiles Fig. 3 Typical failure modes of steel target (Case 1, $v_i=726.341\text{ m/s}$)

弹体侵彻单一钢板过程中,弹体接触靶板时,弹体与靶板均产生塑性波并发生塑性变形,接触区的钢板材料受到弹体的挤压而向外翻转,形成明显的唇边。弹体对钢靶板的撞击使钢靶板的弹靶接触区与相邻区域产生较大的速度差,弹靶接触区与相邻区域发生相对运动,使弹靶接触面边缘产生剪切变形。随着侵彻的深入,弹体和被剪切区域构成封闭区域,塑性功转化的热量无法及时耗散,产生局部高温,弹靶接触区边界产生热软化效应,发生绝热剪切破坏,如图 3(b)所示。在绝热剪切过程中,弹体与靶板产生的局部高温使得塞块和弹体黏在一起,见图 2(a)。弹体在撞击钢靶的过程中发生墩粗变形,类似钝头弹侵彻中厚靶,发生绝热剪切破坏。

聚脲涂层涂覆于钢靶背弹面时,由于聚脲的刚度较小,不足以对前面板的变形产生较大的约束,因此迎弹面钢板的破坏模式与球头弹侵彻纯钢板的破坏模式相似,形成明显的唇边,同时发生绝热剪切破坏。绝热剪切封闭区的高温会灼烧部分聚脲涂层。弹体未贯穿钢靶板时,聚脲涂层随钢靶一起产生局部塑性变形,如图 4(b)所示;弹体贯穿钢靶板时,弹体与塞块一起侵彻聚脲涂层,由于聚脲涂层具有良好的弹性和柔韧性,会产生大变形,而钢板变形较小,使得聚脲涂层与钢板之间发生拉伸撕裂破坏,

此时弹靶接触界面受到剪切力和拉伸力;随着弹体侵入聚脲涂层,弹靶接触面边界处产生弹性应变,在弹体挤过聚脲涂层后,聚脲涂层回弹,形成小于弹体直径的弹孔。由图5(a)可以看出,聚脲涂层的弹孔小于钢板处的弹孔,弹孔呈倒锥形;从图5(b)可以看出,弹孔处凸起,有法向变形,撕裂范围为直径为40.5 mm的圆形区域。



(a) Front surface of the target (b) Back surface of the target

图4 靶板的典型破坏模式(工况3, $v_i=516.01$ m/s)

Fig. 4 Typical failure modes of target (Case 3, $v_i=516.01$ m/s)



(a) Front surface of the target (b) Back surface of the target

图5 靶板的典型破坏模式(工况3, $v_i=809.331$ m/s)

Fig. 5 Typical failure modes of target (Case 3, $v_i=809.331$ m/s)

聚脲涂层涂覆于钢靶迎弹面时,由于惯性效应,靶板与弹体之间产生很大的压缩应力。在高应变率下,聚脲涂层的刚度可以增加10~20倍^[12],呈玻璃态。因此在弹体撞击靶板时,弹靶接触区的聚脲涂层呈玻璃态,弹靶接触区以外的聚脲涂层仍呈橡胶态。玻璃态聚脲中应力波波速比常态聚脲涂层中的应力波波速增加3~5倍。由于弹体速度大于橡胶态聚脲的应力波波速,在弹性波还未传播到背弹面时,弹体已经穿透靶板,因此反射的拉伸波未能短时间内传播到弹靶接触区,使得该区域产生封闭的高应变率区,弹体与弹靶接触区一起挤压聚脲涂层,运动至钢板。钢板抑制了聚脲涂层的纵向变形,聚脲涂层相当于弹体侵入靶板的缓冲层,在一定程度上降低了弹体速度。当弹体侵入速度较大时,弹靶接触区附近的聚脲涂层因加压向外翻,产生与钢靶之间的撕裂破坏。弹体贯穿聚脲涂层后,聚脲涂层发生回弹。弹体贯穿聚脲后速度减小,弹体挤压钢板,塑性应力波减小,钢板开坑阶段不明显,钢板仍发生绝热剪切破坏,如图6(b)所示。



(a) Front surface of the target (b) Back surface of the target

图6 靶板的典型破坏模式(工况4, $v_i=688.817$ m/s)

Fig. 6 Typical failure modes of target (Case 4, $v_i=688.817$ m/s)

3.2 抗侵彻能力分析

弹道极限是衡量特定冲击环境下靶板抗冲击能力的重要指标。弹道极限越大,靶板的抗侵彻能力越强。根据Recht-Ipson公式^[13],采用最小二乘法,对实验测得的初始速度-剩余速度进行拟合,如图7所示,得到球形弹侵彻靶板的弹道极限(仅适用于初速度大于弹道极限的情况),表达式为

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{1/p} \quad (1)$$

式中: v_{bl} 为弹道极限速度; a 和 p 为拟合参数, $a = m_p / (m_p + m_{pl})$, m_p 和 m_{pl} 分别为子弹和冲塞块的质量。

由于球形弹侵彻靶板会产生冲塞块,因此 $a < 1$ 。根据实验结果,可以拟合出球头弹侵彻聚脲涂层复合靶板的弹道极限及模型参数,见表4。

从图7和表4可以看出:工况6的弹道极限最大,接下来依次是工况5、工况4、工况2、工况3和工况1,说明近似面密度下聚脲涂层复合靶板的弹道极限大于纯钢板的弹道极限;工况6与工况5相比,弹道极限提升1.27%,工况4与工况3相比,弹道极限提升7.61%,说明相同聚脲喷涂厚度条件下在钢板前面喷涂聚脲时的靶板弹道极限大于在钢板后面喷涂聚脲。

由图7(c)和图7(d)可知,聚脲涂层为迎弹面和背弹面时,初始速度-剩余速度曲线存在交点,可以认为:弹速在弹道极限附近情况下,聚脲涂层为迎弹面时靶板的抗冲击能力高于聚脲涂层为背弹面时;而在高速情况下,聚脲涂层为背弹面时靶板的抗弹能力较好。这是由于在弹速较低时,聚脲涂层涂覆于钢靶迎弹面时,聚脲涂层增加的刚度较小,传递给钢靶的应力波弱,对钢板未产生影响;而高速时,聚

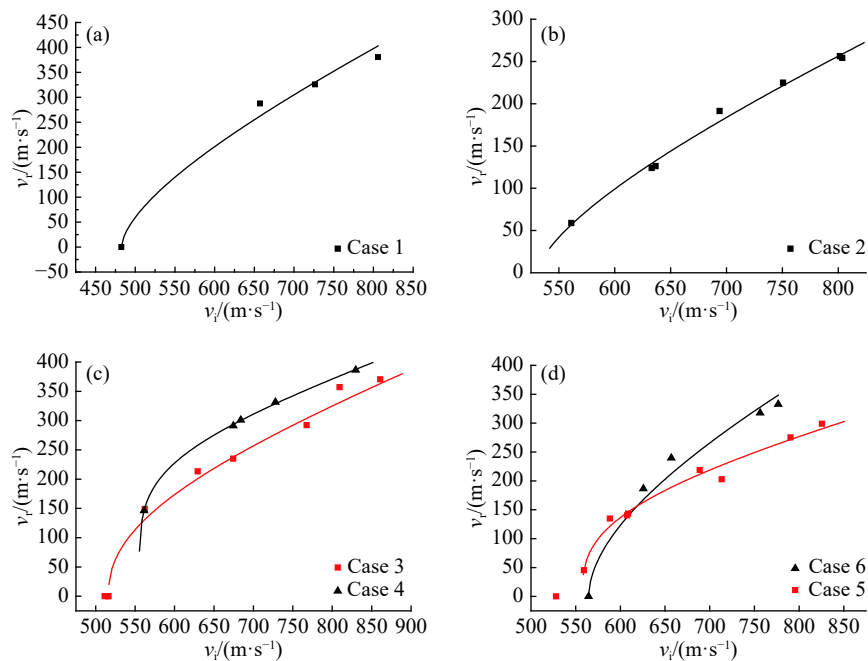


图 7 弹体侵彻靶板的初始速度-剩余速度曲线

Fig. 7 Residual velocity vs. initial velocity of projectile penetrating target

表 4 靶板弹道极限及模型参数

Table 4 Ballistic limits and model constants of targets

Case	a	p	$v_{bl}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Case	a	p	$v_{bl}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.7168	1.6053	482.46	4	0.4821	4.8354	555.29
2	0.5329	1.5135	530.58	5	0.4012	2.9034	557.34
3	0.4966	2.2811	516.01	6	0.7006	1.8298	564.44

聚脲涂层的应变率大, 刚度增加较大, 传播给钢靶的应力波增强, 使得靶板预变形, 促进靶板的破坏; 在超高应变率下, 聚脲涂层的弹性层作用明显减弱, 聚脲对钢板抗弹性能的增强作用较弱。聚脲涂层涂覆于钢靶板背弹面时, 在侵彻速度较小时, 钢靶板传播给聚脲涂层的弹性应力波弱, 聚脲呈现橡胶态, 以变形吸能为主; 而弹速较高时, 聚脲涂层的刚度增加, 产生聚脲冲塞块, 弹体动能转化为冲塞块动能和变形能。聚脲涂层复合结构与单一钢靶相比, 相同面密度下聚脲复合靶板的弹道极限大于单一钢靶的弹道极限, 这是由于聚脲涂层可以延缓颈缩, 提高弹道效应。

4 结 论

(1) 球形弹侵彻钢板-聚脲复合结构靶板时, 聚脲涂层处的弹孔孔径均明显小于弹体直径, 呈倒锥形, 钢板与聚脲材料界面出现撕裂分层现象, 并且聚脲涂层为迎弹面时, 钢板弹孔处形成唇边。

(2) 球形弹侵彻迎弹面有聚脲涂层的复合靶板时, 前涂层可作为弹性层, 对弹体撞击钢板起缓冲作用, 弹体墩粗变形小于纯钢靶以及背弹面有聚脲涂层时靶板的变形。由于聚脲涂层对钢板的支撑力较小, 因此弹体在侵彻纯钢靶时的变形与聚脲涂层涂覆于钢靶后侧时相似。

(3) 弹体冲击过程中, 前涂层能有效缓冲弹体与钢靶之间的撞击载荷, 使钢靶产生预变形, 降低弹体的相对侵彻速度, 延缓钢靶绝热剪切破坏的发生; 后涂层可与钢靶协调变形, 形成冲塞质量块吸能。聚脲涂层位于迎弹面时复合结构的弹道极限高于聚脲涂层位于背弹面时复合结构的弹道极限, 弹速大于弹道极限时前涂层的吸能能力小于后涂层。

参考文献:

- [1] SHIM J, MOHR D. Using split Hopkinson pressure bars to perform large strain compression tests on polyurea at low, intermediate and high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(9): 1116–1127.
- [2] SHIM J, MOHR D. Rate dependent finite strain constitutive model of polyurea [J]. *International Journal of Plasticity*, 2011, 27(6): 868–886.
- [3] 黄微波. 喷涂聚脲弹性体技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] ROLAND C M, FRAGIADAKIS D, GAMACHE R M. Elastomer–steel laminate armor [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(5): 1059–1064.
- [5] YI J, BOYCE M C, LEE G F, et al. Large deformation rate-dependent stress–strain behavior of polyurea and polyurethanes [J]. *Polymer*, 2006, 47(1): 319–329.
- [6] SARVA S S, DESCHANEL S, BOYCE M C, et al. Stress–strain behavior of a polyurea and a polyurethane from low to high strain rates [J]. *Polymer*, 2007, 48(8): 2208–2213.
- [7] PATHAK J A, TWIGG J N, NUGENT K E, et al. Structure evolution in a polyurea segmented block copolymer because of mechanical deformation [J]. *Macromolecules*, 2008, 41(20): 7543–7548.
- [8] 甘云丹, 宋力, 杨黎明. 弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 15–18.
GAN Y D, SONG L, YANG L M. Numerical simulation for anti-blast performances of steel plate coated with elastomer [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 15–18.
- [9] 宋彬, 黄正祥, 翟文, 等. 聚脲弹性体夹芯防爆罐抗爆性能研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 138–144.
SONG B, HUANG Z X, ZHAI W, et al. Anti-detonation properties of explosion-proof pots made of sandwich structures with polyurea elastomer [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(7): 138–144.
- [10] 侯海量, 朱锡, 谷美邦, 等. 破片模拟弹侵彻钢板的有限元分析 [J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(3): 78–83.
HOU H L, ZHU X, GU M B, et al. Investigation on penetration of steel plate by fragment simulated projectile using finite element method [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2006, 18(3): 78–83.
- [11] 邓云飞, 张伟, 孟凡柱, 等. Q235 钢单层板对平头刚性弹抗穿甲特性研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 43(2): 74–78.
DENG Y F, ZHANG W, MENG F Z, et al. Ballistic resistance of Q235 steel monolithic plates impacted by rigid blunt-nosed projectiles [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 43(2): 74–78.
- [12] AMIRKHZI A V, ISAACS J, MCGEE J, et al. An experimentally-based viscoelastic constitutive model for polyurea, including pressure and temperature effects [J]. *Philosophical Magazine*, 2006, 86(36): 5847–5866.
- [13] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1963, 30(3): 384–390.

Penetration Mechanism of Polyurea Coating Composite Structure

GAO Zhao, LI Yongqing, HOU Hailiang, LI Mao, ZHU Xi

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For exploring the perforation mechanism of the polyurea coating composite structure, the ballistic tests in which the target was made of steel plate coated with elastomer were carried out. During the experiment, the damage modes of projectiles and targets were obtained and employed for further analysis. The pre-polyurea coating can effectively buffer the impact load between the spherical projectile and the steel target, so that the steel target is pre-deformed, the relative penetration velocity is reduced, resulting in further improving the ballistic limit of composite structure. The post-polyurea coating can deform coordinately with the steel plate and form a plug mass to absorb the kinetic energy of projectile. The results also show that the steel target with post-polyurea coating could achieve better energy absorbing at higher projectile velocity.

Keywords: polyurea coating composite structure; penetration mechanism; ballistic limit; energy absorbing