

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0303

93W 杆式弹超高速撞击多层 Q345 钢靶 毁伤及微观分析*

李名锐¹, 冯 娜^{1,2}, 蔡青山³, 陈春林¹, 马 坤¹, 尹立新¹, 周 刚¹

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

2. 北京理工大学材料学院, 北京 100081;

3. 中南大学粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为了解杆式弹超高速撞击多层薄钢靶的破坏过程及毁伤机理, 开展了克级 93W 杆式弹正撞击多层 Q345 钢靶实验及数值模拟研究, 通过扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 及金相显微镜, 分析了超高速撞击实验后靶板材料的微观组织及成分。结果表明, 超高速撞击作用下, 靶板呈现出“翻唇”穿孔变形、花瓣状塑性变形、撕裂、撞击成坑及鼓包等破坏模式。靶板前 3 层毁伤以超高速穿孔为主, 孔洞数目多但面积小, 后几层靶板毁伤孔洞数目少且孔径呈先增大后减小趋势。微观分析表明靶材在强冲击压力下发生晶粒碎化、熔化及再结晶, 撞击过程中会形成微孔聚集与微裂纹, 可见靶板失效主要是熔融混合物冷却过程中产生的热应力与切应力下的剪切撕裂综合作用的结果。

关键词: 93W; 杆式弹; 多层 Q345 靶; 微观分析; 毁伤模式

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Damage of a multi-layer Q345 target under hypervelocity impact of a rod-shaped 93W projectile

LI Mingrui¹, FENG Na^{1,2}, CAI Qingshan³, CHEN Chunlin¹, MA Kun¹, YIN Lixin¹, ZHOU Gang¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China;

2. School of Materials Science and Engineer, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to research the penetration characteristics and damage mechanism of multi-layer targets under hypervelocity impact, experiments and numerical simulations were carried out on a rod-shaped 93W projectile impacting a multi-layer Q345 steel target. A gram-order rod-shaped 93W projectile together with a sabot was launched by a 57/10 mm two-stage light gas gun to penetrate into a ten-layer Q345 target. The damage photos of the target after penetration were transformed into binary images by a Matlab processing software. The equivalent diameter of the center hole, the number and total areas of the holes, the diameters of damage circles of the ten-layer target were summed up and analyzed. The AUTODYN software was used to perform the smoothed particle hydrodynamics simulation. Then the microscopical data of the target plates were obtained by scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy to analyze the microstructure and element composition. Results show that a rod-shaped 93W projectile could penetrate 8 or 9 layers of a ten-layer Q345 target under different initial impact velocities. Perforated lips, petal-shaped plastic deformation, tearing, cratering and bulging were formed

* 收稿日期: 2020-08-27; 修回日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(11402213, 11772269)

第一作者: 李名锐(1983—), 男, 博士, 副研究员, fengna@nint.ac.cn

通信作者: 周 刚(1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, gzhou@nint.ac.cn

in target plates. These failure modes are attributed to plastic expanding failure and shear tearing under shear stress. The damage mode of the first three layers of the target is dominated by hypervelocity perforation due to the high impact velocity, with many holes but small area, while the holes in the later layers are few, but the diameter increases first and then decreases as the masses and velocities of fragments decrease. The simulation results were verified by the experimental results. They are in good agreement with the experimental results. Micro analysis shows that the materials of the target and projectile are melt, while the grains are broken up, refined, melt and recrystallized in the target plates. There are aggregated micropores and microcracks formed during the penetration process. The micro analysis results show that the damage failure is mainly caused by the combined effects of thermal stress during the cooling process of the molten mixture and shear tearing under the shear stress, which is consistent with the macro-scopical results.

Keywords: 93W; rod-shaped projectile; multi-layer Q345 target; micro analysis; damage mode

钨合金杆式动能弹超高速侵彻多层金属靶板, 是一个高度非线性的复杂问题, 要完整描述弹靶作用动力学过程, 需要考虑弹靶材料的加工硬化、应变率效应、弹塑性变形、冲击相变、破裂、损伤以及弹、靶撞击引起的冲击波传播等。而因受技术与方法限制, 钨合金杆式动能弹超高速侵彻多层金属靶板实验数据较少, 大部分工作为理论模型^[1-2]与数值模拟研究^[3-6]。对超高速动能弹侵彻多层金属靶板的机理研究仍处于起步阶段, 破坏机制尚不清晰, 因此深入研究杆式动能弹超高速侵彻多层金属靶板的作用机理十分必要。

随着微观观测手段的进步, 对比动能弹侵彻前后弹靶微观组织结构的变化, 分析弹靶作用过程中弹靶在微观尺度上的变形、组织演化、破坏失效等, 可为理论模型分析和数值模拟提供有效的实验依据。李金泉^[7]分析了 93W 侵彻 45 钢厚靶的弹孔及残余弹体微观结构和侵彻过程, 研究了不同微观组织结构对抗弹性能的影响, 给出了提高装甲防护能力的方法。罗荣梅^[8]通过分析钨合金侵彻 30CrMnMo 厚靶后的残余弹体和弹坑的微细观组织, 结合数值模拟方法, 分析了弹靶相互作用。高华等^[9]对速度约 1 012 m/s 的弹丸侵彻多层异质复合靶中装甲钢变形的细观和微观机理进行了研究, 给出了弹丸侵彻装甲钢过程力学行为与变形机理的内在联系, 为弹丸侵彻复合靶板的动力学特征及结构优化设计提供了理论依据。但大多数研究的弹丸速度一般低于 1 800 m/s^[7-10], 研究对象主要为中厚度的装甲钢靶板^[7-8]、钢筋混凝土或复合靶^[11-16], 但动能弹超高速碰撞毁伤目标的机理与低速碰撞、高速碰撞存在显著区别^[16-17]。而基于空间碎片防护研究中, 超高速撞击靶目标主要为铝等轻质材料^[18-19], 毁伤机理也不同。因此, 开展多层重金属薄板结构受超高速动能弹侵彻后的微观与毁伤效应研究, 验证超高速撞击作用过程及毁伤机理, 对优化弹体结构、设计弹靶材料、提升弹体对多层金属靶目标结构的毁伤能力以及其他采用立体间隔薄金属结构提高防护和抗打击能力均有重要指导意义。

本文中, 开展克级 93W 杆式弹超高速撞击多层 Q345 靶板实验及 3 层靶板数值模拟, 并对实验后靶板穿孔及坑洞进行微观观测, 从材料微观组织形貌、成分等方面进行深入研究, 探讨超高速侵彻多层钢板的过程及毁伤机理。

1 超高速碰撞实验

1.1 实验材料

弹体材料选用 93W 钨合金, 密度为 17.6 g/cm³, 静态屈服强度为 731 MPa。弹体为 $\varnothing 3.45 \text{ mm} \times 17.5 \text{ mm}$ 的杆式弹, 弹体质量为 2.81 g。靶板材料选用 Q345 钢, 密度为 7.83 g/cm³。靶板为 $\varnothing 49 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 等厚均质钢靶, 靶板各层间距不等, 其中靶板第 2 层间距最大, 靶板共计 10 层并在其后放置防护板, 采用螺栓与法兰紧固连接。弹托材料为聚碳酸酯(PC), 密度为 1.2 g/cm³, 弹托质量为 2.72 g, 弹托外径为 10 mm, 弹托结构内含 45 钢垫片。共开展实验 2 发, 实验 1 弹体初始撞击速度为 2.25 km/s, 实验 2 弹体初始撞击速度为 2.76 km/s。

1.2 实验方法

实验中利用 57/10 mm 二级轻气炮将弹体发射至目标速度, 通过激光遮断法对弹体速度进行测量。弹体由弹托携带, 共同撞击多层 Q345 钢靶, 弹体着靶姿态满足垂直正撞。实验后对各层靶板宏观毁伤情况进行测量拍摄。对各层靶板进行取样(15 mm×11 mm)、打磨、抛光、腐蚀(4% 硝酸酒精溶液), 采用 Nova Nano SEM 230 场发射扫描电镜观察显微组织形貌, 采用 LEICA MEF 4A/M 金相显微镜观察金相组织。

2 结果与分析

超高速实验 1 和实验 2 分别穿透 8 层及 9 层 Q345 钢靶, 并在相应的后一层钢靶表面形成明显弹坑。毁伤模式主要有“翻唇”穿孔变形、花瓣状塑性变形、撕裂、成坑及鼓包等。

2.1 靶板宏观形貌

实验 1 中各层靶板正面毁伤情况如图 1 所示, 实验 2 中各层靶板正面、背面及侧面毁伤情况如图 2~4 所示。随撞击速度的提高, 靶板被穿透层数增多。首层靶板破坏形式为中心穿孔, 第 2~7/8 层靶板出现中心穿孔及大量破片撞击产生的孔洞及弹坑, 第 8/9 层出现少量孔洞及撞击坑, 末层为微量弹坑破坏。首层靶板中心弹孔为规则圆形, 孔径分别约为 15.38、16.20 mm, 穿孔孔径随弹体速度的升高而变大, 穿孔断面较光滑, 靶板出现“翻唇”变形, 正反面塑性翻边宽度分别约为 1、2 mm。这是由于弹体初始速度较高, 其撞击靶板所产生的压力远高于靶板材料的破坏强度, 靶板在动态剪切破坏及挤压作用下形成扩孔型穿孔, 靶板平面几乎无变形; 弹体穿透首层靶板后, 弹体联合前级撞击随机形成的弹体破片、靶板破片及弹托破片群继续作用于后续靶板, 挤压推动靶材向前变形弯曲, 在较高的径向和环向拉伸应力作用下, 使第 2~8/9 层靶板结构屈服变形并在弹靶接触点四周形成星状裂纹, 微裂纹在破片群的作用下继续扩展, 使靶体弹孔呈现花瓣状开裂弯曲, 破片撞击靶板表面形成大量离散分布的孔洞、撞击坑及靶板背面鼓包。随着贯穿靶板层数的增加, 弹速不断降低, 弹体尺寸减小, 对靶板侵彻能力逐渐下降, 产生的破片数量逐渐减少, 破片群冲击靶板产生的撞击坑数量也逐渐减少。剩余弹体被完全消耗后, 破片动能不足以对靶板形成有效冲击, 仅有极少量速度较大的破片击穿第 8/9 靶板, 在末层靶板上仅出现少量破片撞击坑, 至此侵彻过程结束。

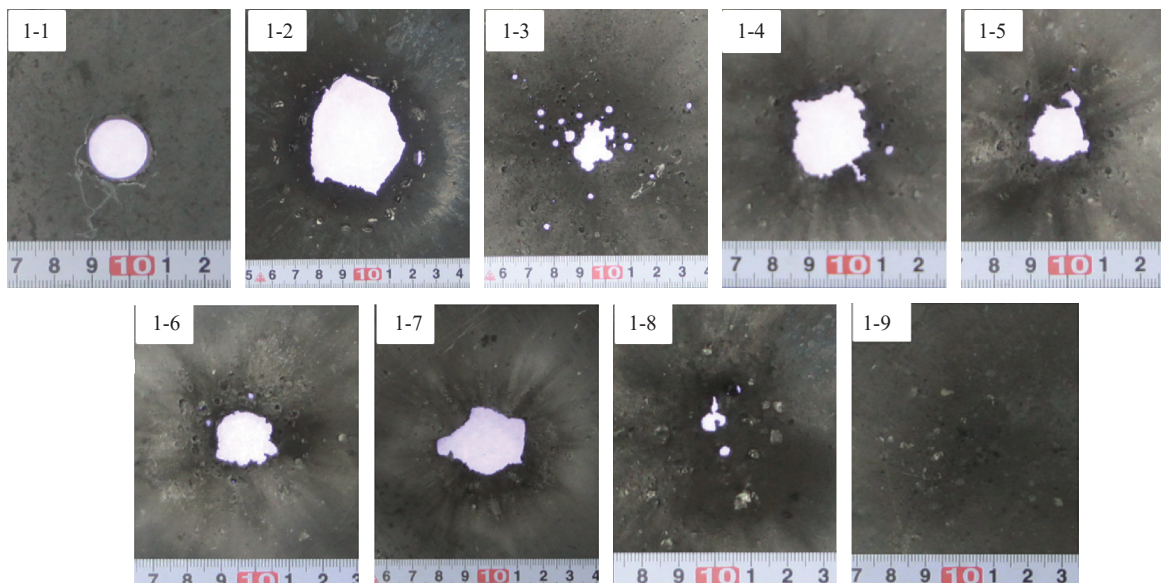


图 1 实验 1 中 10 层靶板各层正面的毁伤

Fig. 1 Damage at the front face of each layer of a ten-layer target in experiment 1

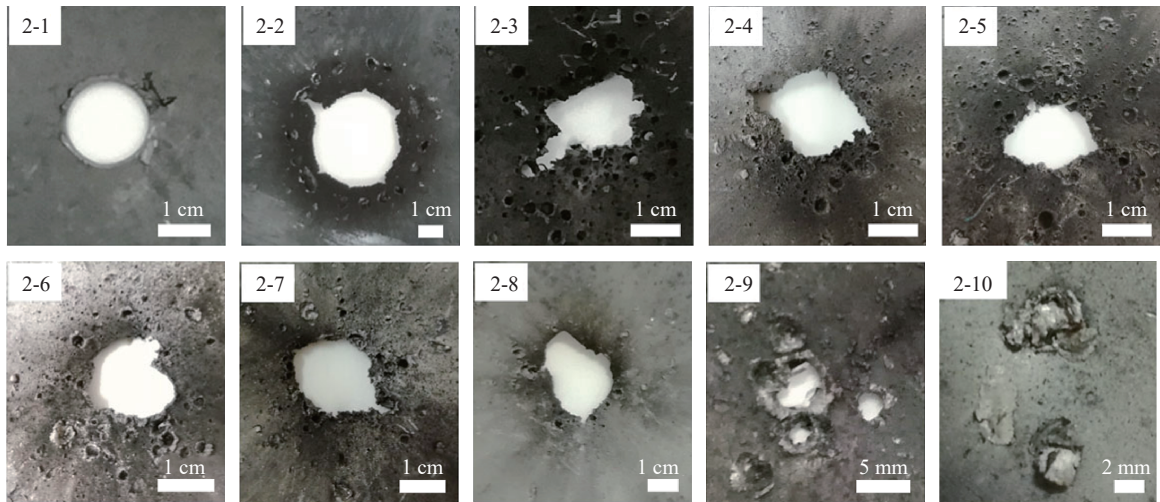


图 2 实验 2 中 10 层靶板各层正面的毁伤

Fig. 2 Damage at the front face of each layer of a ten-layer target in experiment 2

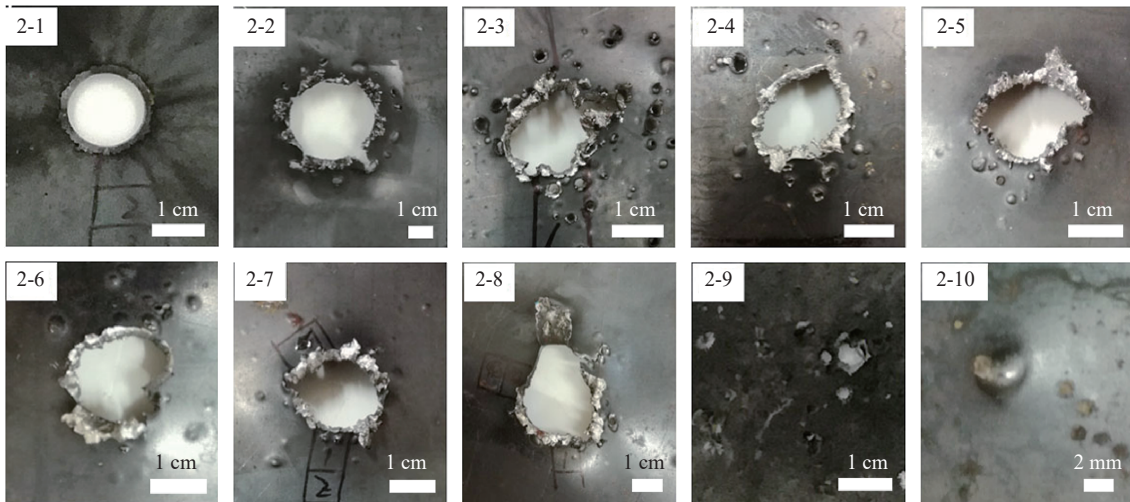


图 3 实验 2 中 10 层靶板各层背面的毁伤

Fig. 3 Damage at the back face of each layer of a ten-layer target in experiment 2

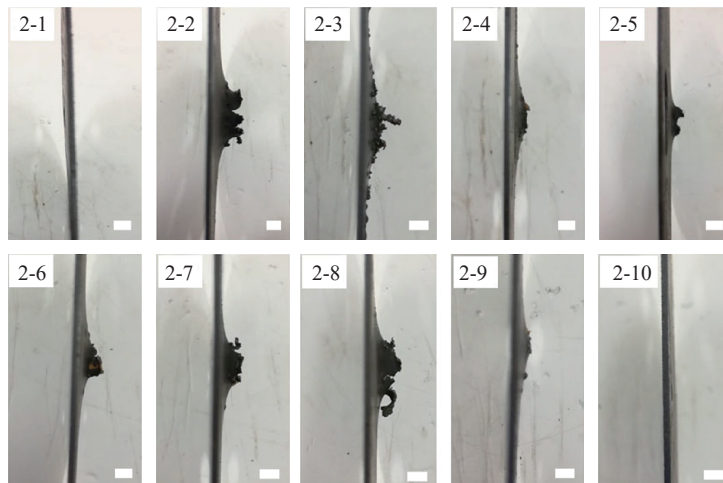


图 4 实验 2 中 10 层靶板各层毁伤侧视图(图中标尺均为 5 mm)

Fig. 4 Side view of damage in each layer of a ten-layer target in experiment 2 (the scale bars all represent 5 mm)

采用 Matlab 自编程序将实验后各层靶板照片转化为二值化图进行图像识别, 并对 2 发实验后各层靶板孔洞总数目及孔洞毁伤总范围进行统计分析。如图 5 所示, 孔洞数目及毁伤范围覆盖圆直径均呈增大趋势, 在第 3 层达到最大后减小, 随弹体速度提高, 穿孔数目增多, 毁伤覆盖圆直径呈现“双峰”特征。中心孔等效直径及穿孔毁伤总面积在第 2 层达到最大后开始减小, 随撞击速度提高, 前 3 层中心穿孔尺寸和毁伤面积覆盖圆直径变化较小, 且 2 发实验靶板最后 4 层的中心孔等效直径、穿孔毁伤总面积及毁伤范围覆盖圆直径基本呈现逐渐增大后急剧减小的趋势。其原因为前 3 层靶板由于破片群动能较高, 其损伤以超高速穿孔为主, 孔洞数目多但面积小; 到最后 3 层靶板时, 弹体基本破碎, 如实验 2 的数值模拟结果表明弹体在侵彻 6 层靶板后基本破碎, 而后形成大量质量小、速度低的破片群被靶板阻挡, 相当于对靶板施加以面力作用, 使靶板发生穿孔或塑性变形, 表现为孔洞数目少但孔径变大。破片穿透 2 层靶后, 破片动能不足以对靶板形成有效冲击, 仅有极少量速度较高的破片击穿末层靶板, 出现少量破片撞击坑, 因此各统计结果呈增大后急剧降低的现象。

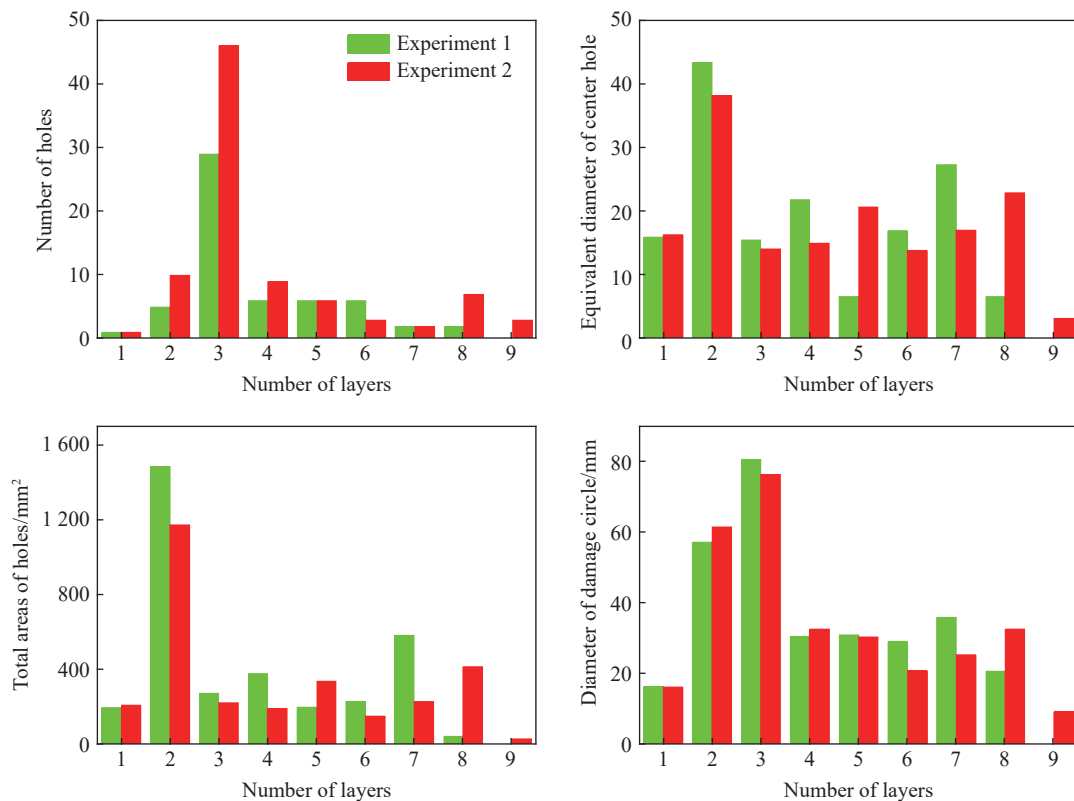


图 5 实验后 10 层靶板各层的孔洞数目、中心孔等效直径、穿孔毁伤总面积及毁伤范围覆盖圆直径

Fig. 5 Equivalent diameter of center hole, number and total areas of holes, diameter of damage circle in each layer of ten-layer targets after experiments

2.2 数值模拟分析

选用 ANSYS AUTODYN 软件中的 SPH (smoothed particle hydrodynamics) 方法模拟了 93W 杆式弹以 2.76 km/s 的速度撞击 3 层靶板的过程。弹体材料为 93 W, 靶板材料为 Q345 钢。弹体直径为 3.45 mm, 长径比为 5。3 层靶板厚度为 1.5 mm, 其中首层靶板直径为 80 mm, 后 2 层直径均为 120 mm。建立三维面对称模型, 对弹、靶及弹托材料均选用冲击状态方程^[20]:

$$p = p_H + \gamma\rho(e - e_H) \quad (1)$$

其中,

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 u(1+u)}{[1-(s-1)u]^2} \quad (2)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \frac{u}{(1+u)} \quad (3)$$

为冲击波关系式, 式中 γ 为 Grüneisen 系数, ρ_0 和 c_0 分别为材料初始密度及声速, u 为粒子速度, s 为常数, 由冲击波实验关系式:

$$D = c_0 + su \quad (4)$$

确定, 式中 D 为冲击波速度。

材料的强度模型方面, 对弹体选用 Steinberg 强度模型^[21], 其剪切模量 G_W 及屈服强度 Y_W 的表达式分别为

$$G_W = G_{W0} \left[1 + \left(\frac{1}{G_{W0}} \frac{dG_W}{dp} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{1}{G_{W0}} \frac{dG_W}{dT} \right) (T - 300) \right] \quad (5)$$

$$Y_W = Y_{W0} (1 + \beta \varepsilon_{Wp})^{n'} \left[1 + \left(\frac{1}{Y_{W0}} \frac{dY_W}{dp} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{1}{Y_{W0}} \frac{dY_W}{dT} \right) (T - 300) \right] \quad (6)$$

式中: G_{W0} 为初始剪切模量, p 为压力; $\eta = V_{W0}/V_W$ 为压缩比, V_{W0} 和 V_W 分别为初始体积和过程体积; T 为温度, 单位为 K; Y_{W0} 为初始屈服强度, ε_{Wp} 为等效塑形应变, β 、 n' 为材料参数。

对靶板材料 Q345 钢采用 Johnson-Cook 强度模型^[22], 其屈服强度 Y_s 的表达式为:

$$Y_s = (A + B \varepsilon_{sp}^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{sp}}{\dot{\varepsilon}_{s0}} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (7)$$

式中: ε_{sp} 为等效塑形应变, $\dot{\varepsilon}_{sp}$ 为等效塑形应变率, $\dot{\varepsilon}_{s0}$ 为参考应变率, T_0 为参考温度, T_m 为熔化温度; A 、 B 、 n 、 C 、 m 为材料参数。

对弹托采用 Piecewise-JC 强度模型^[23], 该模型是基于 Johnson-Cook 模型修正的, 采用屈服应力 Y 与有效应变 ε_p 的分段线性函数替代 Johnson-Cook 模型中的有效应变表达项 $A + B \varepsilon_p^n$, Piecewise-JC 强度模型中的应变率相关项及热软化项与 Johnson-Cook 模型中的相同。

上述材料的具体参数如表 1~3 所示, 表中 Y_{\max} 为最大屈服强度, 模型具体信息及模型有效性验证参考文献 [3]。0.1 ms 内模拟结果如图 6 所示, 其中, 弹、弹托及钢片共同撞击首层靶板, 形成中心穿孔, 穿透后的弹、弹托及前级产生的破片继续侵彻第 2 层靶板, 0.04 ms 第 2 层靶板孔径约为 20 mm, 后在破片群面力作用下, 靶板受挤压推动继续向前变形弯曲并最终呈现出接近 90° 的花瓣开裂弯曲, 随后弹、弹托及破片群继续作用于后级靶板。与实验毁伤结果符合较好。将模拟结果的 SPH 粒子相关数据进行筛选后, 采用区间投影及图像识别法识别靶板毁伤情况, 如图 7 所示。首层靶呈现规则的中心穿孔, 第 2 层靶板呈现中心撕裂穿孔, 与实验结果较一致。不足之处为未出现主孔附近由于破片撞击产生的圈状规则成孔, 应进一步改进弹托聚碳酸酯的材料参数。第 3 层靶呈现中心穿孔及周围不规则小穿孔, 与实验结果吻合较好。表 4 给出了 3 层毁伤面中主孔等效直径的实验及模拟结果, 从表 4 可以看出模拟结果与实验结果误差较小。

表 1 93 钨合金的状态方程、强度模型材料参数

Table 1 Parameters of the equation of state and the strength model for 93W alloy

$\rho_{W0}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c_{W0}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	s_W	γ_{W0}	G_{W0}/GPa	Y_{W0}/GPa	$Y_{W,\max}/\text{GPa}$	β	n'	$\frac{dG_W}{dp}$	$\frac{dG_W}{dT}/(\text{MPa} \cdot \text{K}^{-1})$	$\frac{dY}{dp}$
17.6	4.04	1.23	1.67	132	1.4	6	1.3	0.1	1.794	-40	0.019 027

表 2 Q345 钢的状态方程、强度模型材料参数

Table 2 Parameters of the equation of state and the strength model for Q345 steel

$\rho_{s0}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c_{s0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	s_s	γ_{s0}	A/MPa	B/MPa	n	C	m	T_m/K	$\dot{\varepsilon}_{s0}/\text{s}^{-1}$
7.83	4 569	1.49	2.17	374	795.7	0.454 5	0.015 86	0.885 6	-1 795	0.001

表 3 聚碳酸酯的状态方程、强度方程材料参数

Table 3 Parameters of the equation of state and the strength model for polycarbonate

$\rho_{PC,0}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c_{PC,0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	s_{PC}	$\gamma_{PC,0}$	E/GPa	$Y_{PC,0}/\text{MPa}$
1.2	1 933	2.65	0.61	1	80.6

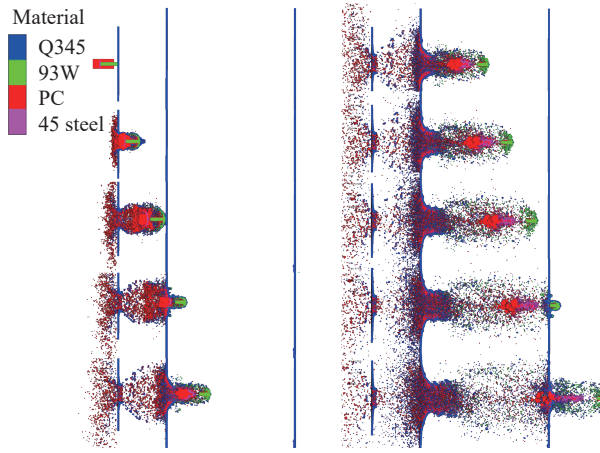


图 6 93W 弹体以 2.76 km/s 的速度撞击 3 层靶的数值模拟过程(0~0.1 ms, 间隔 0.01 ms)

Fig. 6 A numerically simulated sequence for the penetration process of a rod-shaped 93W projectile with the initial velocity of 2.76 km/s into a three-layer Q345 target from 0 to 0.1 ms at the time interval of 0.01 ms

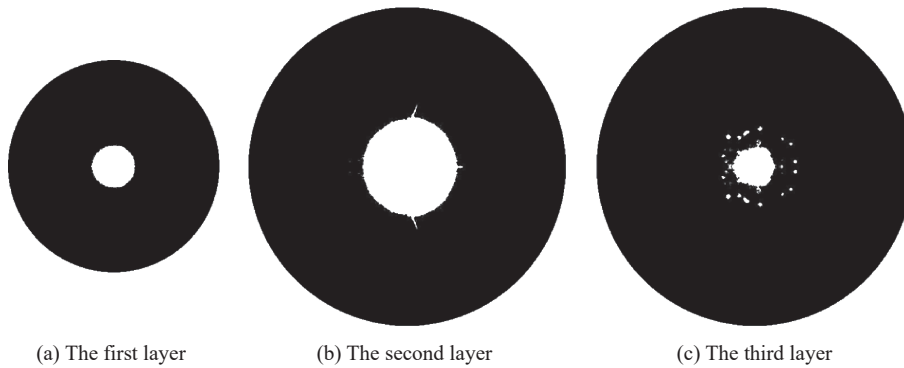


图 7 数值模拟得到的 3 层 Q345 钢靶各层毁伤情况

Fig. 7 Numerically-simulated damage in each layer of the three-layer Q345 steel target

表 4 3 层靶各层毁伤面主孔等效直径实验及模拟结果比较

Table 4 Experimental and simulated results of the equivalent diameter of the center hole in each layer of the three-layer Q345 steel target

层别	等效直径/mm		误差/%
	实验	模拟	
第1层	16.34	16.15	1.162
第2层	38.11	36.29	4.773
第3层	14.06	15.44	9.809

2.3 靶板微观组织

为研究弹靶作用过程及超高速多层穿甲毁伤机理, 对实验毁伤后各层靶板的微观组织及成分进行分析。

2.3.1 首层“翻唇”穿孔断面分析

图 8 为实验 2 首层靶板撞击后的“翻唇”穿孔断面形貌, 红色箭头为弹体撞击方向, 断面中存在一定数量的撞击坑、微孔洞与熔融结构(黄色椭圆框)及微裂纹(红色小箭头)。通过能量色散谱(energy dispersive spectrum, EDS)分析: 发现靶板表面存在 O 元素, 证明靶板在撞击作用下被氧化; 弹孔出口处观察到 W 元素, 而弹孔入口处无 W 元素, 且沿出口方向 W 含量逐渐增多。推测原因为: 杆式弹超高速贯穿薄板过程中, 靶板材料在强冲击作用下出现扩孔现象, 孔入口边缘并未接触 93W 弹体, 之后弹体头部发生塑性流动, 逐渐形成与孔径相当的蘑菇头, 且弹体反溅破片群作用于弹孔, 出口处较入口处作用更强, 从而使沿弹孔方向 W 含量增加。

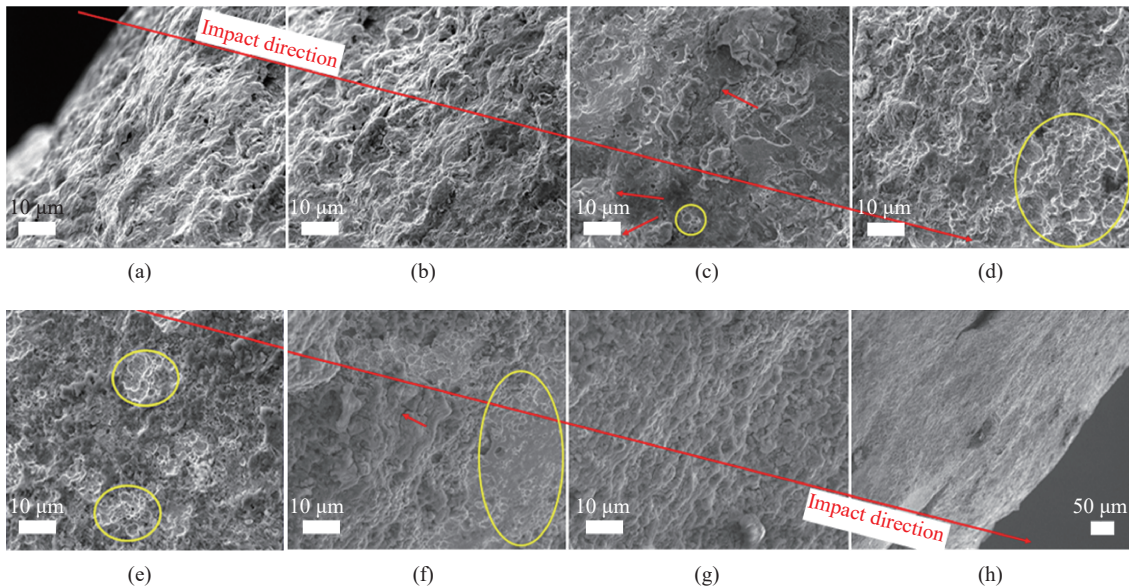


图 8 首层“翻唇”穿孔断面扫描电镜图像

Fig. 8 Scanning electron microscope images for cross-sections of perforated lips on the first layer

图 9 为靶板“翻唇”穿孔周围沿径向方向不同区域的 SEM 图。微观组织呈现出 4 个不同区域: 熔化快凝层、细晶层、形变层和正常靶材组织^[7]。形成原因如下: 超高速弹体撞击多层钢靶, 侵彻动能转化为材料热能与破碎功, 侵彻过程仅几微秒, 大量热量来不及消散, 使局部温度急剧升高, 导致弹、靶接触处薄层内的金属快速熔化和破碎。侵彻过程瞬间完成后, 局部熔化的金属又迅速冷却, 在弹坑和弹孔表面形成厚度不均的熔化快凝薄层, 厚约 5 μm。EDS 分析显示仅此区域存在 W 元素; 紧邻熔化快凝层约 10 μm 厚的细晶层受热传导作用, 经历短暂但温度很高的受热过程, 受冲击波作用铁素体被拉长、破碎, 随后小晶粒长大成 3~5 μm 的再结晶晶粒, 此为再结晶细晶层, 拉长的珠光体形成白亮的条带; 紧邻再结晶细晶层 20 μm 厚的区域未发生再结晶, 受冲击波作用铁素体形成亚微米尺度的细晶层, 为变形细晶层; 细晶层与正常基体组织之间的区域为形变层, 此区域随冲击挤压作用越来越小, 晶粒的变形越来越小, 最后趋于正常组织结构, 厚 1~2 mm。金相结果(图 10)显示, 在弹体强冲击作用下, 弹孔边缘处的微观组织发生了显著变化, 晶粒细小化, 铁素体呈细长状, 长细比增大。沿径向方向随距离增大, 晶粒逐渐变大, 后趋于正常组织, 与 SEM 分析结论一致。

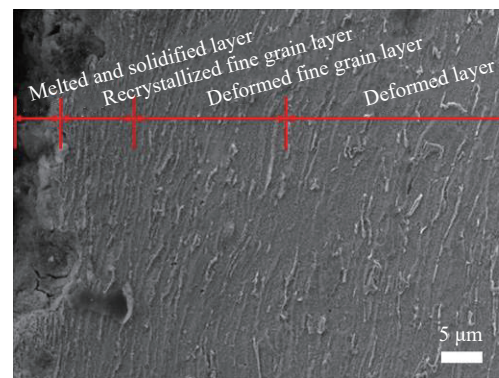


图 9 首层靶板表面穿孔周围扫描电镜图像

Fig. 9 Scanning electron microscope image along the radial direction around the perforated hole in the first layer

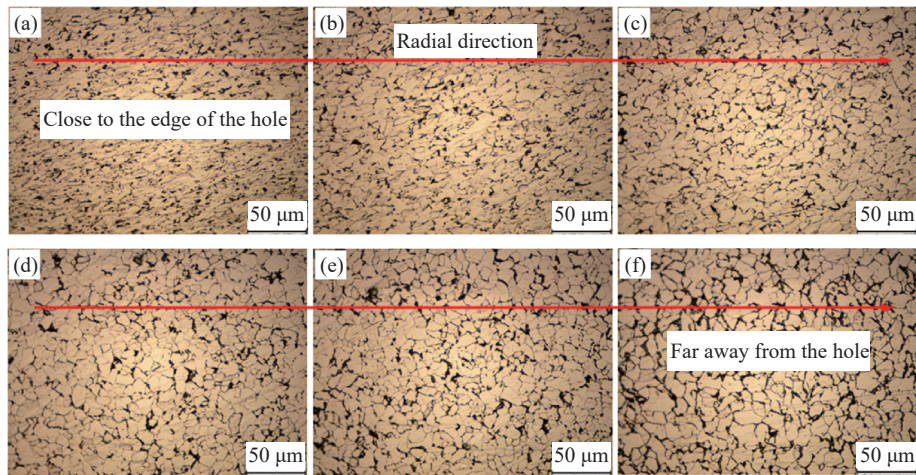


图 10 首层靶板表面穿孔周围金相图((a)→(f): 从弹孔边缘到远离弹孔)
 Fig. 10 Metallographic images along the radial direction around the perforated hole in the first layer ((a)→(f): from the edge of the perforated hole to away from the perforated hole)

分析了 $\varnothing 3.45$ mm、长径比 3 的杆式弹经脱壳后以 3 km/s 的速度撞击 6 层 (2 mm+1 mm \times 5) 厚 Q235 板的各层 SEM 断口形貌(见图 11), 第 1 层靶板断面较光滑, 韧窝较少, 说明该层毁伤以动态剪切破坏为主; 第 2 层靶板断面出现了熔化迹象, 说明弹体超高速撞击第 1 层靶板产生了高温, 高温的超高速弹体侵入第 2 层靶板, 使第 2 层靶板出现大面积的熔化, 且第 2 层靶板厚度减半, 使第 2 层靶板出现了一定的拉伸延性破坏, 断面扫描可观察到一定数量的韧窝, 随着速度的降低、弹体碎裂引起的质量减小及靶板厚度的相对减薄, 断面出现大量韧窝, 说明第 3~5 层靶板以拉伸延性破坏为主。

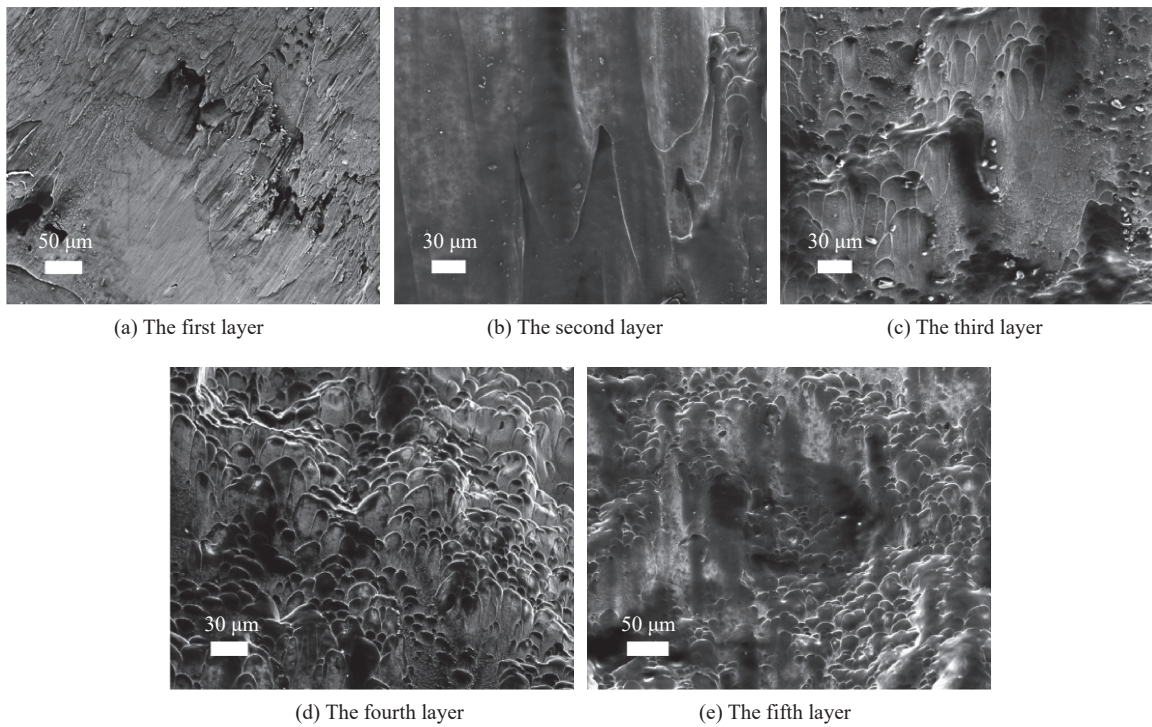


图 11 $\varnothing 3.45$ mm、长径比 3 的杆式弹脱壳后以 3 km/s 速度撞击 6 层 Q235 板各层 SEM 断口形貌
 Fig. 11 SEM fracture morphology of a six-layer Q235 target under the 3 km/s impact of a rod-shaped projectile with the diameter of 3.45 mm and the aspect ratio of 3

2.3.2 花瓣状弹孔表面及靶板表面分析

对第 7 层靶板的不规则花瓣状弹孔表面进行 SEM 分析(见图 12), 结果显示, 花瓣状弹孔表面存在明显熔融后的凝固组织(黄色箭头), 区域内存在大量微孔洞和微裂纹, 且在花瓣状弹孔顶端凝固现象最为明显, 并呈现出液相流动花纹形貌, 说明弹体撞击时在弹孔表面形成了大量熔融态物质, 该物质在撞击压力作用下不断沿靶板向外流动, 流动方向如蓝色箭头所示。图 12(b) 中熔化后凝固的无定形态物质(红色框图)EDS 表征(表 5)显示, 其成分为含有 W、Ni 的富 Fe 相, 说明在其接触表面发生了两种高温熔体材料的互溶, 进一步证明了弹靶材料在超高速撞击过程中发生了熔化。

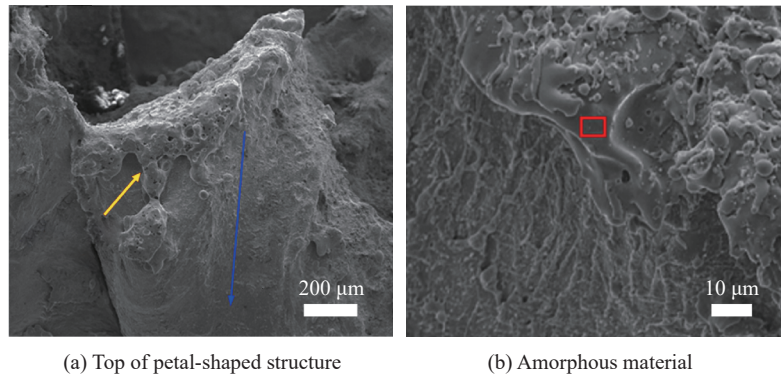


图 12 靶板 2-7 花瓣穿孔形貌 SEM 图

Fig. 12 SEM images of the perforation in the 7th layer of experiment 2

表 5 第 7 层靶板中熔化后凝固的无定形态物质能量色散谱结果

Table 5 Energy dispersive spectrum analysis of amorphous material solidified after melting in the 7th layer

元素	质量分数/%	原子数分数/%	元素	质量分数/%	原子数分数/%
C	2.45	13.14	Ni	2.18	2.39
Fe	63.38	73.23	W	32.00	11.23

2.3.3 破片撞击坑微观分析

多层靶受弹体高速撞击后, 第 2~8 层靶板表面存在大量破片撞击坑及孔洞, 对其进行微观结构分析, 发现撞击坑主要有两种形貌: 图 13(a) 表面圆润光滑, 像液体浇筑后的表面形貌, 主要是撞击产生的高温使得弹坑周围材料熔化; 图 13(b) 表面粗糙, 为明显机械撞击后的变形形貌, 主要是撞击产生的高压使得弹坑物质发生塑性变形。EDS 分析(见表 6)显示, 两种坑均含有 Fe、W、C、O 等元素, 说明坑产物为弹、靶混合物。93W 弹超高速撞击薄钢板产生破片群, 破片群中的高温高压破片继续撞击后级板, 由于 W 的熔点高达 3 410 °C^[7], Fe 首先熔化, W 的成分可能是破碎的 W 颗粒包裹在熔化快凝层中, 也可能是在高速侵彻过程中局部区域的温度达到了 W 的熔点, 形成含有 W、Fe 的熔化快凝物。进一步研究撞击坑附近存在的大量表面光滑的片状物质, 如图 13(c) 椭圆框图所示, 局部无 W 颗粒和 Fe 颗粒, 图 13(d) 中 EDS 分析显示为 W-Fe-O 基化合物, 表明钨合金弹体与钢材在高温、高压下发生了液相互溶, 从而形成了 W-Fe-O 新相, 证明了液相钨的存在。

破片撞击坑表面局部存在许多微裂纹(图 13(a) 红色箭头所示), 微裂纹是由于熔融混合物在冷却过程中, 由于冷却速度过快, 产生的冷却热应力作用形成的。并在弹靶相互作用以及内部相互挤压等作用下, 微裂纹扩展形成宏观裂纹, 造成撕裂。因此, 材料失效可认为主要是熔融混合物冷却过程中产生的热应力与切应力下的剪切撕裂综合作用的结果。

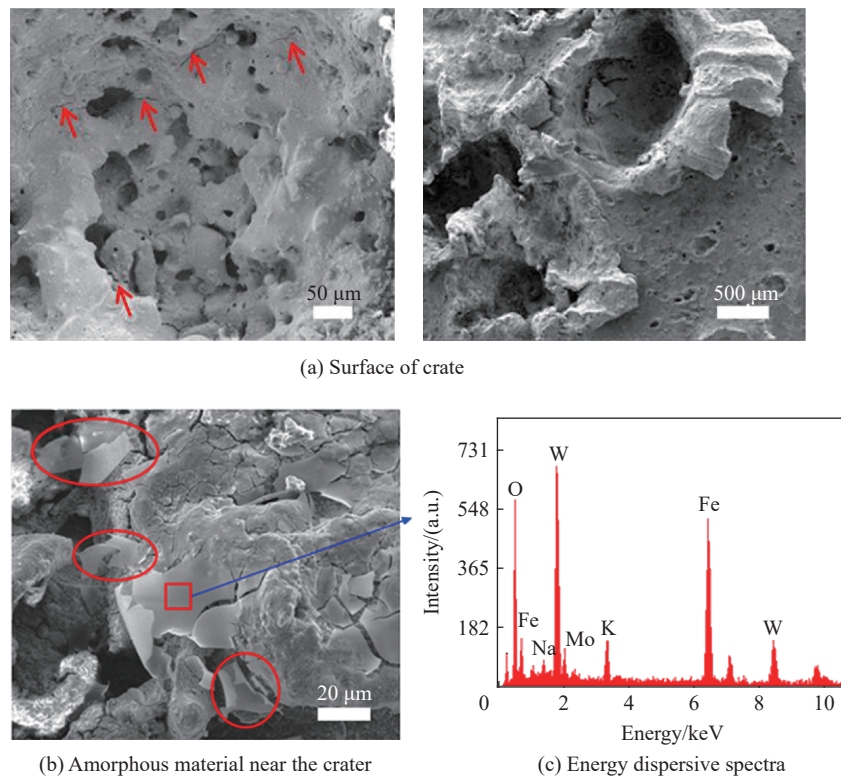


图 13 靶板表面弹坑及坑附近区域无定形态物质 SEM 图及无定形态物质能量色散谱
 Fig. 13 SEM images of the craters at the surface of the target and amorphous material near the craters as well as their energy dispersive spectra

表 6 撞击坑及孔洞熔化后凝固的无定形态物质 EDS 结果

Table 6 EDS analysis of amorphous material solidified after melting in impact crater and cavity

元素	质量分数/%	原子数分数/%	元素	质量分数/%	原子数分数/%
C	4.67	17.12	K	12.67	3.01
O	15.75	43.37	Fe	30.03	23.70
Na	0.78	1.49	W	44.94	10.77
Mo	1.17	0.54			

3 结 论

通过超高速钨合金杆式弹撞击多层钢板实验、数值仿真研究与微观组织演化规律、能谱分析研究, 得出如下结论:

(1) 超高速撞击产生瞬时高温、高压环境, 在瞬时载荷作用下, 靶板呈现出穿孔“翻唇”变形、花瓣状变形、撕裂、撞击成坑及鼓包等破坏模式。弹体撞击后, 在穿孔断面、靶板表面孔洞及弹坑等处, 存在大量微孔和微裂纹, 使靶板破坏形式表现为塑性扩孔性破坏以及在切应力作用下的剪切撕裂。

(2) 靶板前 3 层由于破片群动能较高, 靶板毁伤以超高速穿孔为主, 孔洞数目多且面积小; 而对于后几层靶板, 由于弹体解体后形成的破片群质量小、速度低, 对靶板施加面力作用, 使靶板发生穿孔或塑性变形, 表现为孔洞数目少且孔径呈先增大后减小的趋势, 直至侵彻结束。

(3) 微观分析表明靶材在强冲击压力下发生晶粒碎化、熔化及再结晶, 撞击过程中会形成微孔聚集与微裂纹, 表明靶板失效主要是熔融混合物冷却过程中产生的热应力与切应力下的剪切撕裂综合作用的结果。

感谢中南大学刘文胜教授、马运柱教授对本文微观测试及部分分析工作给予的帮助。

参考文献:

- [1] 龙源, 岳小兵, 周翔, 等. 高速钢弹对多层大间隔金属靶的侵彻特性研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2004, 28(4): 369–374. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9830.2004.04.008.
LONG Y, YUE X B, ZHOU X, et al. Characteristics of high-speed steel projectiles penetrating into multi-layer spaced metal plates [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, 28(4): 369–374. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9830.2004.04.008.
- [2] 肖云凯, 吴昊, 方秦. 长杆弹超高速侵彻金属靶体的实验和模型分析 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(S1): 15–23.
XIAO Y K, WU H, FANG Q. Experiment and theoretical model analysis of hypervelocity penetration of long-rod projectiles into metallic targets [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(S1): 15–23.
- [3] 马坤, 李名锐, 陈春林, 等. 93 钨合金弹体超高速撞击钢板破片群分布数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(10): 2022–2031. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.007.
MA K, LI M R, CHEN C L, et al. Simulation analysis of distribution of fragments of hypervelocity 93w projectile impacting on a steel plate target [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(10): 2022–2031. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.007.
- [4] 赵汝岩, 卢洪义, 朱敏. 杆式动能体侵彻多层靶板数值仿真 [J]. *弹箭与制导学报*, 2012, 32(6): 96–98, 116. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2012.06.029.
ZHAO R Y, LU H Y, ZHU M. Numerical analysis of rod kinetic energy projectile penetrating into multilayer spaced metal plates [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(6): 96–98, 116. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2012.06.029.
- [5] 刘洋, 姚江涛, 李国林, 等. 用数值模拟法研究战斗部侵彻多层间隔靶 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2009, 24(2): 144–148. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2009.02.007.
LIU Y, YAO J T, LI G L, et al. Numerical simulation of warhead penetrating into multi-layer spaced target [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2009, 24(2): 144–148. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2009.02.007.
- [6] 汪庆桃, 吴克刚, 陈志阳. 圆柱形长杆超高速正碰撞薄板结构破碎效应 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(5): 54–60. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.009.
WANG Q T, WU K G, CHEN Z Y. Fragmentation effect of a long cylindrical rod with a hypervelocity normally impacting a thin plate structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5): 54–60. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.009.
- [7] 李金泉. 穿甲侵彻机理及绝热剪切带特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005: 22–42.
LI J Q. Study of armor-piercing mechanism and adiabatic shear banding characteristic [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005: 22–42.
- [8] 罗荣梅. 细晶钨合金穿甲弹靶作用机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 19–55.
LUO R M. Study on penetration mechanism of fine-grained tungsten heavy alloy penetrator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 19–55.
- [9] 高华, 熊超, 殷军辉. 弹丸侵彻多层异质复合靶板中装甲钢变形细观和微观机理研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(8): 1565–1575. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.08.013.
GAO H, XIONG C, YIN J H. Research on macroscopic and microscopic mechanisms of deformation of armor steel in multilayer heterogeneous composite target subjected to projectile [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(8): 1565–1575. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.08.013.
- [10] 李争, 刘元雪, 张裕. 动能弹侵彻机理及其防护研究进展 [J]. *兵器装备工程学报*, 2016, 37(3): 9–14. DOI: 10.11809/scbgxb2016.03.003.
LI Z, LIU Y X, ZHANG Y. Research progress of kinetic energy projectile penetration mechanism and protection [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(3): 9–14. DOI: 10.11809/scbgxb2016.03.003.
- [11] 刘宗伟, 武海军, 张学伦, 等. 高超弹体侵蚀机理及抗侵蚀设计研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(4): 46–49. DOI: 10.11809/scbgxb2017.04.010.
LIU Z W, WU H J, ZHANG X L, et al. Eroding mechanism and anti-eroding design technique of high speed penetrator [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(4): 46–49. DOI: 10.11809/scbgxb2017.04.010.

- [12] 钱秉文, 周刚, 李进, 等. 钨合金弹体超高速撞击混凝土靶成坑特性研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(10): 1012–1017. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.10.004.
QIAN B W, ZHOU G, LI J, et al. Study of the crater produced by hypervelocity tungsten alloy projectile into concrete target [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(10): 1012–1017. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.10.004.
- [13] 蒋东, 李永池, 于少娟, 等. 钨合金长杆弹侵彻约束 AD95 陶瓷复合靶 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 91–95. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0091-05.
JIANG D, LI Y C, YU S J, et al. Penetration of confined AD95 ceramic composite targets by tungsten long rods [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 91–95. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0091-05.
- [14] 李平, 李大红, 宁建国, 等. Al_2O_3 陶瓷复合靶抗长杆弹侵彻性能和机理实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(4): 289–294. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2003.04.001.
LI P, LI D H, NING J G, et al. Experimental study on the ballistic performance and mechanism of confined ceramic targets against long rod penetrators [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(4): 289–294. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2003.04.001.
- [15] 楼建锋. 侵彻半无限厚靶的理论模型和数值模拟研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012: 25–41.
LOU J F. Theoretical model and numerical study on penetrating into semi-infinite targets[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012: 25–41.
- [16] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1–5.
- [17] 杨益, 李晓军, 朱大明, 等. 超高速碰撞材料毁伤效应研究进展 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37(5): 133–140. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2014.05.037.
YANG Y, LI X J, ZHU D M, et al. Research development of materials damage effect under hypervelocity impact [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(5): 133–140. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2014.05.037.
- [18] 牛瑞涛. 空间碎片铝网防护屏超高速撞击特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 2–10.
NIU R T. Hypervelocity impact characteristic investigation of space debris aluminum mesh bumper[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 2–10.
- [19] 管公顺. 航天器空间碎片防护结构超高速撞击特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 33–35.
GUAN G S. Hypervelocity impact characteristic investigation of spacecraft space debris shield configuration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 33–35.
- [20] Century Dynamics, Inc. AUTODYN theory manual revision 4.3[M]. Concord, CA: Century Dynamics, Inc., 2003.
- [21] STEINBERG D J, COCHRAN S G, GUINAN M W. A constitutive model for metals for applicable at high-strain rate [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51: 1498–1504. DOI: 10.1063/1.327799..
- [22] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands 1983: 541–547.
- [23] 蔡宣明. PBX 炸药动态力学行为及起爆特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 83–84.
CAI X M. Study on dynamic mechanical behavior and initiation characteristic of PBX[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 83–84.

(责任编辑 张凌云)