

doi: 10.7690/bgzdh.2019.11.016

弹丸侵彻双层不同材质靶板的数值模拟

侯 飞, 田晓丽, 杨 波, 刘润华, 王 捷
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为加强装甲目标的防护能力及提高靶板的抗侵彻性能, 对弹丸侵彻双层不同材质靶板进行数值模拟。建立弹丸侵彻靶板的几何和仿真模型, 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 比较了 3 种不同材料靶板的抗侵彻能力, 对不同材质的双层有、无间隔靶板组合的抗侵彻性能进行数值模拟, 并对靶板排列顺序不同对靶板组合抗侵彻性能的影响。模拟结果表明: 双层不同材质的靶板组合的抗侵彻能力与两层靶板的材质和排列方式有关, 双层间隔靶板组合比双层无间隔靶板组合的抗侵彻性能更好。

关键词: 不同材质靶板; 抗侵彻性能; 双层间隔靶板; 双层无间隔靶板; 数值模拟
中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Projectile Penetrating into Double-layer Targets of Different Materials

Hou Fei, Tian Xiaoli, Yang Bo, Liu Runhua, Wang Jie
(College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to enhance the protection ability of the armor target and improve the anti-penetration performance of the target board, the projectile is penetrating into the double-layer different material target panels for numerical simulation. The geometry and simulation model of the projectile penetrating the target plate were established. The ANSYS/LS-DYNA software was used to compare the anti-penetration ability of the three different material targets, and the anti-invasion of the double-layer target with or without spacing of different materials. The performance was numerically simulated, and the influence of different target arrangement order on the anti-penetration performance of the target combination was compared. The simulation results show that the anti-penetration ability of the two-layer target plate combination is related to the material and arrangement of the two-layer target plate. The double-layered spacer plate combination has better anti-penetration performance than the double-layer non-spaced target plate combination.

Keywords: different material targets; anti-penetration performance; double-layer spacer target plate; double-layer non-spaced target plate; numerical simulation

0 引言

随着现代反装甲弹药性能的提高, 世界各国普遍加强了装甲目标的防护能力, 间隔装甲、复合装甲、屏蔽装甲和反应装甲等技术被广泛应用^[1]。针对弹丸侵彻靶板问题, 国内外的许多学者进行了很多研究。有学者研究了弹丸的速度、转速、入射角、攻角等参数对侵彻混凝土在内的多层介质材料的影响^[2-4]。有学者分析了弹丸侵彻多层均质靶板时, 弹重、弹速和弹形等影响因素对侵彻过程的作用规律^[5-8]。还有学者对多层不同材质靶板的抗侵彻能力进行了研究^[4,9-10], 但未充分考虑靶板的材质和排列方式对靶板组合抗侵彻性能的影响。笔者利用动力学软件 ANSYS/LS-DYNA, 对弹丸侵彻不同材质的双层无间隔靶板组合和双层间隔靶板组合进行数值模拟, 分析双层靶板分别在有、无间隔时, 2 层不

同材质靶板排列顺序不同对靶板组合抗侵彻性能的影响, 可对目标防护有指导作用。

1 弹丸侵彻靶板仿真模型

1.1 几何模型和仿真模型的建立

弹丸头部为半球形圆柱体, 其具体尺寸为: 弹头半径 $R=1.5$ cm, 长度 $H=4$ cm; 靶板为 100 cm \times 100 cm \times 0.6 cm 的长方体。仿真模型的建立基于以下假设: 弹丸和靶板为均匀连续介质, 整个侵彻冲击过程为绝热过程, 不计空气阻力, 不考虑重力的作用及靶板的侧边效应, 忽略靶板的整体运动, 弹丸和靶板的初始应力为零^[5]。由于模型的形状和载荷具有对称性, 为了减少计算量, 建立 1/4 模型。计算模型使用 3 维实体 SOLID 164 单元进行划分。为了提高模拟精度, 靶板与弹丸直接作用区域网格加密。

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-18

作者简介: 侯 飞(1996—), 男, 安徽人, 硕士, 从事智能弹药研究。E-mail: Houdezhu1996@qq.com。

在对称边界面上施加对称约束，弹丸和靶板之间的接触采用 *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 算法，在靶板边界处施加非反射边界，采用 cm-g-us 单位制建模^[11-12]。

1.2 弹丸侵彻靶板基本控制方程^[2]

弹丸侵彻靶板的 5 个基本方程为：

$$\rho(X, t)J(X, t) = \rho_0(X); \tag{1}$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i; \tag{2}$$

$$\rho w^{\text{int}} = D_{ji} \sigma_{ij}; \tag{3}$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \tag{4}$$

$$\frac{\nabla}{\sigma} = \frac{\nabla}{\sigma} (D_{ij}, \sigma_{ij} \dots). \tag{5}$$

其中：式(1)为质量守恒方程；式(2)为动量守恒方程；式(3)为能量守恒方程；式(4)为本构方程，是反映材料在侵彻过程中可能出现的弹塑性动力学状态的方程；式(5)为协调方程，是用质量位移速度表示材料应变速率的几何关系式。弹丸侵彻过程边界条件为：

$$u_i(x, t) \Big|_{\text{靶板边界}} = \bar{u}_i(x, t). \tag{6}$$

初始条件为

$$\dot{u}(X, 0) = \dot{u}_0(X) \Big|_{\text{弹体}}, \quad u(X, 0) = u_0(X) \Big|_{\text{靶板}}. \tag{7}$$

式中： ρ_0 和 ρ 分别为初始时刻和现在时刻的介质密度； J 为雅克比行列式； b_i 为作用于物体单位质量上的力； σ_{ij} 为欧拉应力张量，是定义在初始时刻每单位面积上的应力； w^{int} 为单位质量的内能。

1.3 材料模型

由于侵彻过程中弹丸的变形很小，因此，弹丸选用刚性材料模型。其材料参数^[9]如表 1 所示。

表 1 弹丸的材料参数

参数	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量 $E \times 10^{11}/\text{Pa}$	泊松比 ν
数值	8.93	1.17	0.35

靶板采用 *MAT_JOHNSON_COOK 材料模型，笔者共定义 3 种不同的靶板材料模型，其具体参数如表 2—4 所示。其中，参数 ρ 为密度， A 为屈服应力常数， B 为硬化常数， N 为应变硬化指数， C 为应变率系数， M 为温度相关指数， T_m 为熔化温度， T_r 为室温， C_V 为比热。

表 2 靶板 1 的材料参数

参数	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	N	C
数值	7.83	792	510	0.26	0.014
参数	M	T_m/K	T_r/K	$C_V/(\text{J}/\text{kgK})$	
数值	1.03	1 793	300	477	

表 3 靶板 2 的材料参数

参数	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	N	C
数值	7.896	350	275	0.36	0.022
参数	M	T_m/K	T_r/K	$C_V/(\text{J}/\text{kgK})$	
数值	1	1 811	300	452	

表 4 靶板 3 的材料参数

参数	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	N	C
数值	7.75	1539	477	0.18	0.012
参数	M	T_m/K	T_r/K	$C_V/(\text{J}/\text{kgK})$	
数值	1	1 763	300	477	

2 弹丸侵彻靶板数值仿真

2.1 3 种靶板抗侵彻性能研究

为了比较 3 种靶板的抗侵彻能力，分别用 400 m/s 的速度垂直打击 3 种靶板。弹丸和靶板的有限元模型如图 1 所示。

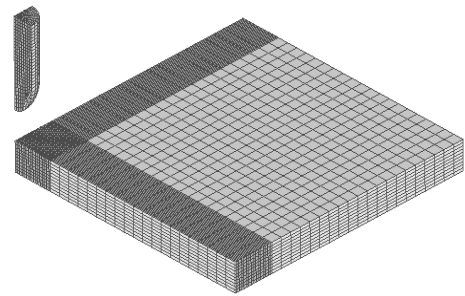


图 1 弹丸和靶板的有限元模型

弹丸以 400 m/s 的速度分别侵彻 3 种靶板时，弹丸的速度时间曲线如图 2 所示。

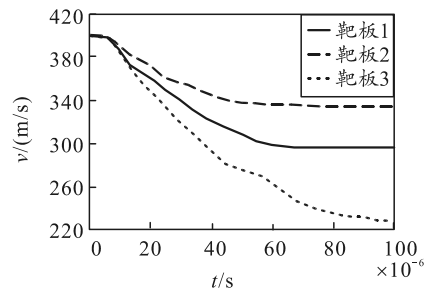


图 2 400 m/s 子弹侵彻不同靶板的速度时间曲线

400 m/s 的弹丸侵彻 3 种靶板的数值模拟结果如表 5 所示。

表 5 靶板抗侵彻模拟结果对比

靶板类别	弹丸侵彻时间 $t/\mu\text{s}$	弹丸剩余速度 $v/(\text{m}/\text{s})$
1	80	296
2	76	334
3	96	228

由图 2 和表 5 可知：弹丸侵彻靶板 3 时所用的时间最长，剩余速度最小，所以靶板 3 的抗侵彻性能最好；靶板 1 的速度时间曲线斜率大于靶板 2 的斜率，说明其对弹丸的侵彻阻力较大，且侵彻靶板 1 时，弹丸的剩余速度比侵彻靶板 2 的剩余速度较小，用时比靶板 2 长；因此，靶板 1 较靶板 2 抗侵彻性能好。综上所述，抗侵彻能力靶板 3 最好，靶板 1 次之，靶板 2 最差。

2.2 双层间隔靶板组合抗侵彻性能模拟

上节中研究了 3 种靶板的抗侵彻性能。为了探索靶板布置的顺序对抗侵彻性能的影响，现分别以 1 000 m/s 的速度垂直侵彻双层间隔靶板，靶板间隔为 4 cm，双层间隔靶板组合的排列布置如表 6 所示。

表 6 双层间隔靶板组合排列布置参数

组合类别	A	B	C	D	E	F
上靶板	靶板 1	靶板 1	靶板 2	靶板 2	靶板 3	靶板 3
下靶板	靶板 2	靶板 3	靶板 1	靶板 3	靶板 1	靶板 2

弹丸侵彻双层间隔靶板时伴随着靶板的破坏和靶板碎片的飞溅，其模型如图 3 所示。

图 4 是弹丸侵彻靶板组合 D 和 F 的速度时间。

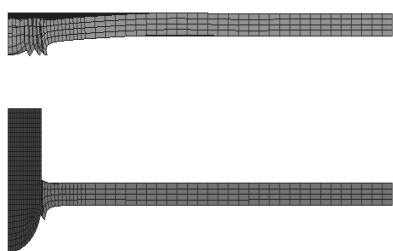


图 3 弹丸侵彻双层间隔靶板模型

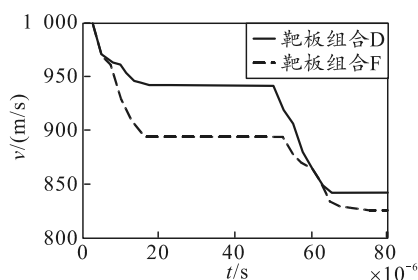


图 4 弹丸侵彻靶板组合 D、F 的速度时间

由图可知：弹丸侵彻靶板组合 F 时，弹丸穿透两层间隔靶板的最终速度为 826 m/s；弹丸侵彻靶板组合 D 时，弹丸穿透两层靶板的最终速度为 842 m/s。靶板组合 F 比靶板组合 D 抗侵彻效果好，所以抗侵彻能力强的靶板 3 在前、抗侵彻能力较差的靶板 2 在后的靶板组合 F 比抗侵彻能力差的靶板 2 在前、抗侵彻能力强的靶板 3 在后的靶板组合 D 抗侵彻效果好。

图 5 是弹丸双层侵彻间隔靶板组合 A、B、C、D、E、F 的速度时间曲线。

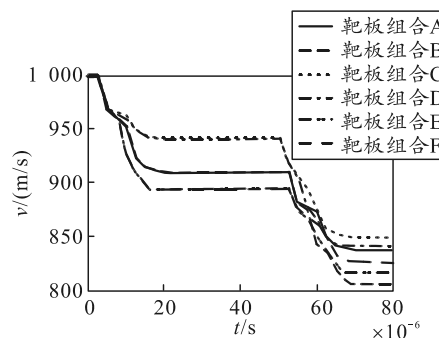


图 5 弹丸侵彻双层间隔靶板组合的速度时间

如图所示：弹丸侵彻间隔双层靶板时，比较弹丸侵彻靶板组合 A、C 的速度时间曲线，抗侵彻能力强的靶板 1 在前、抗侵彻能力较弱的靶板 2 在后的靶板组合 A 比抗侵彻能力弱的靶板 2 在前、抗侵彻能力较强的靶板 1 在前的靶板组合 C 抗侵彻效果好；但在比较弹丸侵彻靶板组合 B、E 的速度时间曲线时，抗侵彻能力强的靶板 3 在前、抗侵彻能力较弱的靶板 1 在后的靶板组合 E 并没有比抗侵彻能力弱的靶板 1 在前、抗侵彻能力较强的靶板 3 在后的靶板组合 B 抗侵彻效果好；同时可以发现，抗侵彻能力最强的靶板 3 和最弱的靶板 2 的组合 D 并没有比抗侵彻能力较弱的靶板 1 和最弱的靶板 2 的组合 A 抗侵彻效果好。因此，双层靶板的抗侵彻能力与构成双层靶板的单层靶板材质和排列布置有关，抗侵彻性能较差的靶板也可通过合理的靶板排列组合达到“逆袭”。

2.3 双层无间隔靶板组合抗侵彻性能模拟

为进一步研究不同材质的双层靶板排列组合对靶板组合抗侵彻性能的影响，以 1 000 m/s 的速度对不同材质的双层无间隔靶板进行垂直侵彻，具体靶板组合参数见表 6。图 6 为弹丸侵彻双层无间隔靶板时的速度时间曲线。

通过图 6 可知：按照抗侵彻能力强弱对靶板组合进行排序，分别是靶板组合 D，靶板组合 B，靶板组合 E，靶板组合 F，靶板组合 C，靶板组合 A。所以在弹丸侵彻双层无间隔靶板时，抗侵彻能力差的靶板 2 在前、抗侵彻能力强的靶板 3 在后的靶板组合 D 比抗侵彻能力强的靶板 3 在前、抗侵彻能力较差的靶板 2 在后的组合 F 抗侵彻效果好，这与上文中弹丸侵彻间隔靶板时正好相反；比较弹丸侵彻靶板组合 A、C 的速度时间曲线可知，抗侵彻能力弱的靶板 2 在前、抗侵彻能力较强的靶板 1 在前的靶板

组合 C 比抗侵彻能力强的靶板 1 在前、抗侵彻能力较弱的靶板 2 在后的靶板组合 A 抗侵彻效果好，这个结果与上文中弹丸侵彻间隔靶板时正好相反；比较弹丸侵彻靶板组合 B、E 的速度时间曲线，抗侵彻能力弱的靶板 1 在前、抗侵彻能力较强的靶板 3 在后的靶板组合 B 比抗侵彻能力强的靶板 3 在前、抗侵彻能力较弱的靶板 1 在后的靶板组合 E 抗侵彻效果好。同时可以看到，双层无间隔靶板组合 D 和 B 对弹丸的抗侵彻性能近乎相同，双层无间隔靶板组合 F 和 C 对弹丸的抗侵彻性能几乎相同。由此可知：双层无间隔靶板组合的抗侵彻性能与靶板的材质和布置方式等有关，要提高双层靶板组合的抗侵彻性能，需要对双层靶板组合的结构进行优化设计。弹丸侵彻双层间隔靶板组合和双层无间隔靶板组合的模拟结果如表 7 所示。

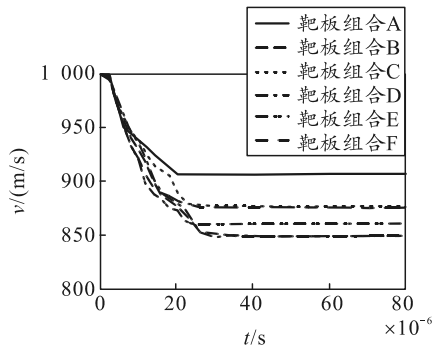


图 6 弹丸侵彻无间隔双层靶板时的速度时间

表 7 弹丸侵彻 2 种靶板组合的模拟结果 m/s

弹丸剩余速度	靶板组合 A	靶板组合 B	靶板组合 C	靶板组合 D	靶板组合 E	靶板组合 F
剩余速度 (双层间隔靶)	838	806	850	842	817	826
剩余速度 (双层无间隔靶)	907	850	877	849	861	876

由表可知：弹丸侵彻双层无间隔靶板组合的剩余速度大于侵彻双层间隔靶板组合的剩余速度，因此，双层间隔靶板比双层无间隔靶板的抗侵彻性能更好。

3 结论

笔者通过对弹丸侵彻排放顺序不同、材质不同

的双层间隔靶板组合和双层无间隔靶板组合进行了数值模拟，得出以下结论：

1) 双层靶板组合的布置方式和材质影响靶板组合的抗侵彻能力。抗侵彻性能较差的靶板可通过合理的靶板排列组合达到“逆袭”。

2) 双层靶板组合的结构对其抗侵彻性能影响很大，要想获得较好的抗侵彻性能，需要对其结构进行优化。

3) 双层间隔靶板比双层无间隔靶板的抗侵彻性能更好。

参考文献：

- [1] 曹红松, 张亚, 高跃飞. 兵器概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 302-303.
- [2] 李勇. 弹体侵彻过程仿真及影响因素分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [3] 周宁, 任辉启, 沈兆武, 等. 弹体侵彻混凝土和钢筋混凝土的实验[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(10): 1021-1027.
- [4] 张建斌. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的弹头侵彻问题分析与研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [5] 纪霞, 王利. 弹丸侵彻多层靶板数值分析[J]. 探测与控制学报, 2006, 28(2): 42-45.
- [6] 宋万成. 多层靶板结构对穿甲影响的模拟仿真实验[J]. 装备制造技术, 2016(4): 30-32.
- [7] 岳小兵, 龙源, 方向, 等. 高速模拟钢质弹丸侵彻多层靶板[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 4(4): 40-44.
- [8] 强洪夫, 孙新亚, 王广, 等. 基于 SPH 的分层钢板抗半球头弹侵彻的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 110-118.
- [9] 孙娟, 杜作娟, 黄小忠, 等. 基于 LS-DYNA 的不同材质靶板抗侵彻能力的数值分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(10): 2296-2301.
- [10] 杜忠华, 赵国志, 杨玉林. 陶瓷/玻璃纤维/钢板复合靶板抗弹性能的研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(2): 219-221.
- [11] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 68-96.
- [12] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 45-100.