

基于 ANSYS/LS – DYNA 分析平头弹侵彻间隙式 双层靶的失效模式

刘 兵, 王红红, 邓勇军

(西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要:侵彻问题一直在军用和民防领域扮演重要角色。近年来针对单层靶通过数值模拟手段得到了较为满意的成果,而针对间隙式双层靶的研究相对较少。基于有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,分别对平头弹撞击 6 mm 和 12 mm 厚的单层靶以及(2×6+24) mm 间隙式双层靶进行数值模拟,采用 Recht-Ipson 公式处理剩余-初始速度,得到以上三种结构形式靶板的弹道极限,并与理论预期和实验结果进行比较;通过数值模拟,证实了平头弹撞击(2×6+24) mm 间隙式双层靶最终的破坏模式为剪切冲塞和绝热剪切冲塞混杂失效,这与理论分析一致。

关键词:穿甲;单层靶;间隙式双层靶;绝热/剪切;LS-DYNA

中图分类号:TB112

文献标志码:A

引 言

在军工防护结构领域,穿甲问题扮演着重要角色。穿甲实验是最重要、最基本的研究方法,但成本高,理论分析有一定的适用范围,而数值模拟技术以其在经济性和效益性方面的优势,日益成为研究穿甲问题不可或缺的研究手段。

刘兵等^[1]基于 Chen and Li^[2-3]的相关理论模型,提出平头弹穿甲间隙式双层靶板最终的破坏模式为考虑结构响应的绝热剪切和剪切冲塞混杂失效,对 Dey 等^[4]的平头弹穿甲 Weldox700E 系列钢靶的试验数据进行系统的分析比较。

Dey 等^[4]在 LS-DYNA 软件里采用修改形式的 J-C 强度模型^[5]和 J-C 断裂准则^[6]对文中实验进行了二维数值模拟,仿真结果与实验数据一致性较好;Teng 等^[7]通过 ABAQUS/EXPLICIT 建立二维轴对称模型,指出平头弹穿甲相同厚度的单层靶和双层靶,双层靶的抗侵彻能力要高 7%~25%;张伟等^[8]通过数值模拟,给出了初始-剩余速度预估值与实验值具有很好的一致性,证实了

弹体撞击第二层靶板存在两种撞击情形。

为了更进一步验证刘兵等^[1]提出平头弹贯穿间隙式双层靶失效模式的正确性,本文将通过 ANSYS/LS-DYNA 来论证平头弹穿透间隙式双层靶的失效模式。

1 有限元模型

1.1 弹靶材料本构模型

在数值模拟中,靶板采用采用 Johnson-Cook (J-C) 强度模型和累积损伤失效模型来描述靶材的力学性能^[5-6],J-C 本构模型常用于模拟金属材料从低应变率到高应变率下的动态行为,该模型利用变量乘积关系分别描述应变、应变率、温度和损伤因子的影响,具体形式为:

$$\sigma = (1 - D)[A + B\varepsilon_p^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*][1 - T^{*m}] \quad (1)$$

式(1)中, A、B、C、n、m 为材料常数; ε_p 是累积塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$ 是无量纲应变率,其中, $\dot{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度,其中 T_m 和 T_r 分别为材料的熔点温度和室温; D 的取值在 0 和 1 之间,初始时 $D = 0$,当 $D = 1$ 时,

材料发生失效。

靶板状态方程采用 Gruneisen 方程:

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (2)$$

式(2)中, E 为材料的内能; C_0 为 v_s-v_p 曲线的截距; S_1 、 S_2 和 S_3 为 v_s-v_p 曲线斜率的系数; v_s 为击波速度; v_p 为质点速度; γ_0 为 Gruneisen 系数; a 是对 γ_0 的一阶体积修正; $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$; ρ 为当前密度; ρ_0 为初始密度。

在数值模拟中, 靶板采用 Johnson-Cook (J-C) 强度模型和累积损伤失效模型来描述靶材的力学性能, 弹体材料模型服从 Von Mises 屈服准则, 采用双线等向强化模型 (Bilinear-Isotropic)。靶板的相关物性参数 (见表 1) 主要参考文献[9], 弹的相关物性参数 (表 2) 主要参考文献[10]。

表 1 Johnson - Cook 模型材料参数

材料	$\rho / (\text{g/cm}^3)$	E / GPa	μ	$C_p / (\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K}))$	T_r / K	T_m / K
钢靶	7.85	210	0.33	452	293	1800
材料	A / MPa	B / MPa	n	C	m	S_1
钢靶	859	329	0.579	0.0115	1.071	1.49
材料	γ_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
钢靶	1.67	0.361	4.768	-5.107	-0.0013	1.333

表 2 弹体模型材料参数

材料	$\rho / (\text{g/cm}^3)$	E / GPa	μ
Weldox700E	7.85	204	0.33

1.2 弹靶有限元模型

在计算模型中, 共有三种工况。基于 ANSYS/LS-DYNA, 分别模拟平头弹穿透厚度为 6 mm 和 12 mm 的单层靶以及间隙式双层靶 (2 × 6 + 24) mm, 靶板半径为 250 mm, 弹为长 80 mm, 直径为 20 mm 的平头弹。数值模拟中, 取四分之一结构进行三维数值模拟, 设定靶板外表面为应力无反射截面, 以模拟无限域。弹和靶板网格均用 Lagrange 映射网格划分方法, 靶中与平头弹撞击区域及其附近区域网格进行加密。网格单元形状为八节点六面体, 弹和靶板单元类型均采用 Solid 164。由于弹体在实验中的变形不明显, 模拟中弹体的尺寸为 1.0 mm × 1.0 mm × 1.0 mm, 靶心单元尺寸为 0.24 mm × 0.24 mm × 0.24 mm, 离靶心较远部分网格比例加大, 如图 1 所示。同时, 为了更进一步减少计算时间, 计算中将 (2 × 6 + 24) mm 间隙式双层靶之间的间隙由 24 mm 减少到 12 mm。在对称边界面上施加对称约束, 在靶板

边界处施加非反射边界, 弹靶之间采用三维面对面侵蚀接触算法, 单位采用 cm-g- μ s 进行模拟。间隙式双层靶及平头弹有限元模型如图 2 所示。

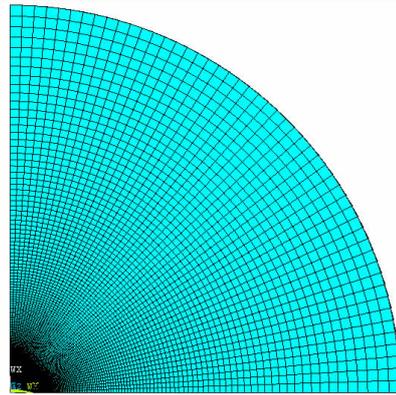


图 1 靶板有限元模型

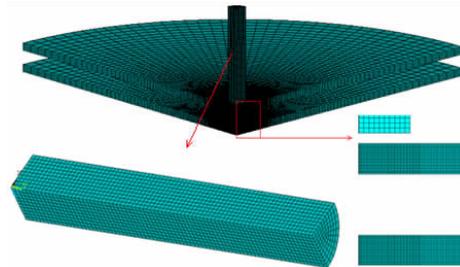


图 2 平头弹撞击间隙式双层靶有限元模型详图

2 数值分析结果

文献中经常使用 Recht-Ipson^[11]公式来处理弹体的剩余 - 初始速度实验或仿真数据, 得到 Recht-Ipson 曲线, 并得到弹靶系统的弹道极限。

2.1 单层靶穿甲的数值模拟

平头弹穿甲 6 mm 单层靶, 将文献[2]分析得到的理论预期和实验数据, 与仿真结果进行对比 (表 1)。从表 1 知, 当弹初速为 245.8 m/s 时, 实验结果为 204.8 m/s, 仿真结果为 207.4 m/s, 绝热剪切分析结果为 201.7 m/s, 理论预期与实验结果和仿真结果误差分别为 1.5%、2.8%, 误差均在 5% 以内, 效果较为理想。根据表 3 中数据, 利用 Recht - Ipson^[11]处理实验数据和仿真结果, 通过 Chen and Li^[2-3]提出的剪切冲塞模型和绝热剪切冲塞模型得到的理论预期, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 图中 3 条曲线的弹道极限 (从左至右) 分别为 140.8 m/s、171.2 m/s、174.3 m/s、213.0 m/s; 数值分析与由剪切冲塞分析得到的弹道极限相近, 误差为 1.8%, 同时也与文献[4]中由二维数值模拟得到的弹道极限 177.5 m/s 相近。因此, 仿真结果和理论预期值得

采信。通过数值模拟,证实了平头弹撞击 6 mm 单层靶最终的破坏模式为剪切冲塞失效。

表 3 6 mm 靶板的理论预期和实验数据以及仿真结果

$V_i/$ (m/s)	$V_{test}/$ (m/s)	$V_{num}/$ (m/s)	$V_{tran}/$ (m/s)	$V_i/$ (m/s)	$V_{test}/$ (m/s)	$V_{num}/$ (m/s)	$V_{tran}/$ (m/s)
350.0	-	303.2	308.2	215.0	-	174.3	167.0
335.0	-	289.9	293.3	196.9	155.0	150.0	144.4
320.0	-	276.5	278.4	181.8	138.3	118.2	122.2
305.0	-	263.0	263.3	174.3	-	0	107.2
290.0	-	249.3	248.0	171.2	-	0	0
275.0	-	235.4	232.6	158.3	116.4	0	0
260.0	-	221.2	216.8	151.5	54.6	0	0
245.8	204.8	207.4	201.7	140.8	4.6	0	0
230.0	-	191.1	184.2				

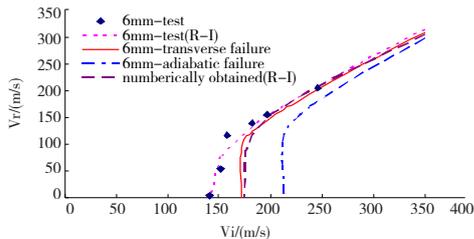


图 3 平头弹撞击 6 mm 单层靶的实验数据和理论以及模拟结果

平头弹穿甲 12 mm 单层靶,将文献[3]分析得到的理论预期和实验数据,与仿真结果进行对比,见表 4。图 4 给出了通过 R-I 公式^[11]处理得到的实验曲线分别由剪切冲塞模型和绝热剪切冲塞模型得到的理论预期、Recht-Ipson 仿真曲线。由图 4 可知,图中 4 条曲线的弹道极限(从左至右)分别为 168.0 m/s、201.6 m/s、206.5 m/s、229.5 m/s,模拟结果与理论预期相近,误差仅为 2.3%,与文献[4]由二维数值模拟得到的弹道极限 213.6 m/s 相近,而模拟结果和理论预期均与由实验数据拟合得到的弹道极限有出入;仿真曲线与绝热剪切冲塞曲线吻合度较好。

表 4 12 mm 靶板的理论预期和实验数据以及仿真结果

$V_i/$ (m/s)	$V_{test}/$ (m/s)	$V_{num}/$ (m/s)	$V_{adi}/$ (m/s)	$V_i/$ (m/s)	$V_{test}/$ (m/s)	$V_{num}/$ (m/s)	$V_{adi}/$ (m/s)
360.0	-	251.5	259.3	186.3	87.5	0.0	0.0
365.7	228.0	248.6	255.9	182.2	85.4	0.0	0.0
330.0	-	225.0	227.2	178.4	75.8	0.0	0.0
305.9	195.0	202.6	200.0	176.8	47.0	0.0	0.0
294.1	192.1	191.0	186.2	176.3	22.0	0.0	0.0
270.0	-	165.7	156.2	174.1	0.0	0.0	0.0
249.4	141.0	140.9	127.7	171.2	20.0	0.0	0.0
235.3	143.3	120.7	105.5	170.8	79.0	0.0	0.0
206.5	-	0.0	39.0	165.1	0.0	0.0	0.0
201.6	-	0.0	3.0	160.6	0.0	0.0	0.0
200.4	92.0	0.0	0.0	159.5	0.0	0.0	0.0
194.1	96.0	0.0	0.0	159.2	0.0	0.0	0.0

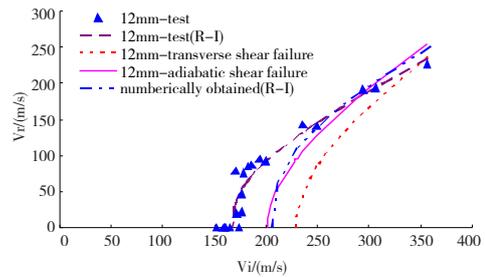


图 4 平头弹撞击 12 mm 单层靶的实验数据和理论以及模拟结果

2.2 间隙式双层靶穿甲的数值模拟

针对平头弹穿甲(2×6+24) mm 间隙式双层靶,将刘兵等^[1]分析得到的剪切/绝热混杂失效预期结果、Dey 等^[4]实验数据、仿真结果进行汇总(表 5)。表 5 中当弹初速为 351.1 m/s 时,实验结果为 189.9 m/s,仿真结果为 199.7 m/s,剪切/绝热混杂失效分析结果为 205.3 m/s,理论预期与实验结果和仿真结果误差分别为 7.5%、2.7%。利用 Recht-Ipson^[11]公式处理实验数据和仿真结果,并得到 Recht-Ipson 曲线,与剪切/绝热混杂失效的理论预期进行比较,如图 5 所示。

表 5 (2×6+24) mm 间隙式双层靶的理论预期和实验数据以及仿真结果

$V_i/$ (m/s)	$V_{test}/$ (m/s)	$V_{num}/$ (m/s)	$V_{mix}/$ (m/s)	$V_i/$ (m/s)	$V_{test}/$ (m/s)	$V_{num}/$ (m/s)	$V_{mix}/$ (m/s)
380.0	-	226.3	235.3	269.3	128.4	101.7	111.5
360.0	-	208.1	214.8	260.3	-	98.9	0.0
351.1	189.9	199.7	205.3	259.7	73.3	78.9	0.0
330.0	-	178.7	180.9	251.7	0.0	77.3	0.0
309.4	89.8	156.2	157.2	249.1	101.7	48.0	0.0
297.0	155.6	141.2	143.8	248.3	-	0.0	0.0
296.7	97.7	140.8	142.3	244.0	69.6	0.0	0.0
282.6	86.4	139.9	127.2	225.2	0.0	0.0	0.0
270.8	96.6	121.3	113.4				

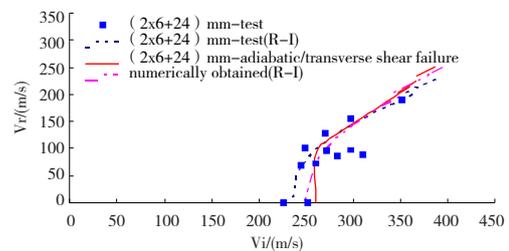


图 5 平头弹撞击(2×6+24) mm 间隙式双层靶的实验数据和理论以及模拟结果

由图 5 可知,图中 3 条曲线的弹道极限(从左至右)分别为 234.6 m/s、248.3 m/s、260.3 m/s,文献[4]中由二维数值模拟得到的弹道极限 250.0 m/s,与由三维拉格朗日算法模拟得到的弹道极限 248.3 m/s 相近;图 5 中 3 条曲线的变化趋势随着弹速的不同,吻合度不同,弹速较高或者在弹道极限附近时,吻合度差异较大,而

在中高速范围内吻合度较高;通过数值模拟,在其弹速适用范围内,证实了平头弹撞击(2×6+24)mm间隙式双层靶最终的破坏模式为剪切冲塞和绝热剪切冲塞混杂失效,这与理论分析一致。特别说明,对于穿甲问题,任何理论模型都有其适用范围。

当弹初速为351.1 m/s时,侵彻(2×6+24)mm间隙式双层靶过程中弹和靶板的Von Mises应力分布见图6。由图6发现,平头弹(2×6+24)mm间隙式双层靶相当于侵彻两层6mm厚的单层靶,6mm靶板属薄靶,整体结构响应明显,弹与靶板作用区域及其附近区域产生了较大的变形,进一步发现第二层靶板的结构变形较第一层靶板大。

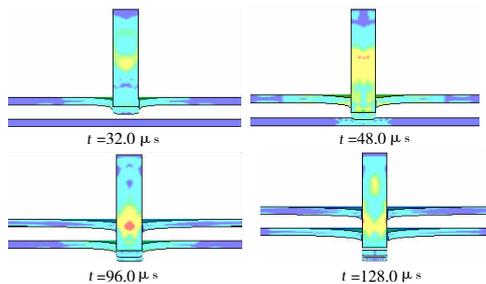


图6 初速为351.1 m/s时,侵彻过程弹和(2×6+24)mm靶的Von Mises应力分布

图7给出了平头弹侵彻间隙式双层靶时侵彻速度和弹尾速度时间历程。平头弹以351.1 m/s的速度正侵彻(2×6+24)mm间隙式双层靶,在弹丸撞击靶板的过程中,弹丸侵彻速度首先经过急剧下降阶段后,速度转为缓慢下降阶段;弹尾速度一直处于缓慢下降阶段。在34~46 μs时弹丸侵彻速度和弹尾速度处于平稳过渡阶段,变化幅度不大,这主要是弹丸穿过第一层靶板后,弹丸穿过间隙,即将同塞块撞击第二层靶板。弹同塞块撞击第二层靶板时,随着速度的下降,侵彻能力也随之下降,侵彻时间长于第一层靶板,产生了较大的弯曲变形,即将穿透第二层靶板时,侵彻速度和弹尾速度均急剧下降,最后处于平稳阶段,两者值近似相等。

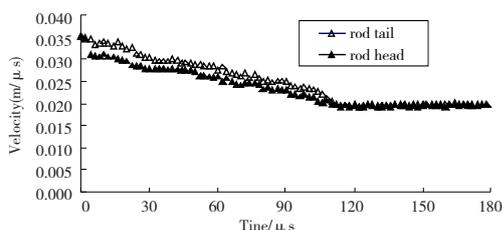


图7 平头弹侵彻间隙式双层靶时侵彻速度和弹尾速度时间历程

4 结束语

本文基于ANSYS/LS-DYNA软件对(2×6+24)mm间隙式双层靶进行数值模拟,进一步论证刘兵等^[1]提出平头弹贯穿间隙式双层靶失效模式的正确性。由三维拉格朗日算法模拟得到(2×6+24)mm间隙式双层靶的弹道极限为248.3 m/s,与Dey等^[4]由二维数值模拟得到的弹道极限250.0 m/s相近;3种曲线的变化趋势随着弹速的不同,吻合度不同,弹速较高或者在弹道极限附近时,吻合度差异较大,而在中高速范围内吻合度较高;平头弹(2×6+24)mm间隙式双层靶相当于侵彻两层6mm厚的单层靶,6mm靶板属薄靶,整体结构响应明显,弹与靶板作用区域及其附近区域产生了较大的变形,进一步发现第二层靶板的结构变形较第一层靶板大;通过数值模拟,在其弹速适用范围内,证实了平头弹撞击(2×6+24)mm间隙式双层靶最终的破坏模式为剪切冲塞和绝热剪切冲塞混杂失效。

参考文献:

- [1] 刘兵,陈小伟.平头弹穿透间隙式双层靶的失效模式分析[J].爆炸与冲击,2015.(录用).
- [2] Chen X W, Li Q M. Shear plugging and perforation of ductile circular plates struck by a blunt projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 513-536.
- [3] Chen X W, Li Q M, Fan S C. Initiation of adiabatic shear failure in a clamped circular plate struck by a blunt projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(7): 877-893.
- [4] Dey S, Borvik T, Teng X, et al. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(20): 6701-6723.
- [5] 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, Netherlands, 1983: 541-547.
- [6] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three Metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.

- [7] Teng X, Dey S, Børvik T, et al. Protection performance of double-layered metal shields against projectile impact[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2007, 2(7):1309-1329.
- [8] 张伟,肖新科,郭子涛,等. 双层 A3 钢靶对平头杆弹的抗侵彻性能研究. 高压物理学报, 2012, 26(2):163-169.
- [9] Dey S, Borvik T, Hopperstad O S, et al. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8-9):1005-1038.
- [10] Borvik T, Hopperstad O S, Berstad T, et al. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration[J]. European Journal of Mechanics, A/Solids, 2001, 20(5):685-712.
- [11] Recht R F, Ipson T W. Ballistic perforation dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions ASME, 1963, 30(3):384-390.

Failure Mode Analysis of Clearance Double-layered Target for Blunt Projectiles Penetration Based ANSYS/LS-DYNA

LIU Bing, WANG Honghong, DENG Yongjun

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: The penetration problem has always played an important role in the field of military use and civil defense. Nowadays, for single-layered plate, it has gained a satisfying achievement by numerical simulation. However, the research on clearance double-layered plate is relatively rare. Based on the finite element software ANSYS/LS-DYNA, the numerical simulations of 6/12mm thick monolithic target and $(2 \times 6 + 24)$ mm thick double-layered target spaced with air impacted by blunt projectiles are achieved. The residual versus initial velocities are deposed by Recht-Ipson formula, then the ballistic limit velocities of the three targets are obtained, and the theoretical expectation is compared with the test data. The numerical simulation verifies that the final failure mode of the $(2 \times 6 + 24)$ mm double-layered plates spaced with air impacted by blunt projectiles is the mixture of shear plugging and adiabatic shear plugging, which coincide with the theoretic analysis.

Key words: perforation; single-layered plate; clearance double-layered plate; adiabatic/shear; LS-DYNA