

对厚水层及多层间隙金属靶平面斜侵彻 全物理过程的数值模拟研究

范中波, 李恩征, 张凤国, 韩 冰

(应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 2D 平面斜侵彻的数值模拟, 可再现对应的 3D 斜侵彻中最严重非对称受力面内的终点弹道效应, 并为近似估算 3D 斜侵彻等效弹迹及等效扩孔横截面积提供基础数据。利用重新设计和改造的 LITZ-2D 程序, 解决了阻抗差异大的多物质厚靶的平面斜侵彻的计算问题, 得到了定性上合理、定量上适用的结果。

关键词: 多层靶; 阻抗; 斜侵彻; 数值模拟

* 中图分类号: O346 文献标识码: A

1 引言

弹靶高速碰撞, 由于存在击靶姿态末制导误差, 不可避免地会形成斜着靶而导致斜侵彻。对侵彻问题的研究虽已有数十年历史, 但对斜侵彻的研究, 却至今仍未形成完整有效的解析分析方法, 实验也只能观察到、入靶处的局部情形并进行有限数据的测量。目前, 只有数值模拟手段可以较全面、仔细地展开对斜侵彻问题的研究^[1]。

但斜侵彻又是一个三维不定常问题, 模拟它对计算机及程序的要求都很高, 而且, 还需耗费大量 CPU 机时。因此, 至今国外发表的成果, 也只限于对那些初始计算区域的网格数不需要太多、网格动态畸变和材料积累损伤不过份严重、各层物质的阻抗差异不过于悬殊的拟均质多层薄靶的三维斜侵彻计算。在国内, 则因三维模拟所需软件, 尤其是硬件的开发、引进尚未达到可实用水平, 因此还只能借助于二维平面不定常来近似模拟三维不定常问题中最严重的非对称受力面所引起的斜侵彻终点弹道效应。即使如此, 直到现在, 也只见到一些对薄靶的二维平面斜侵彻的计算结果发表。对厚靶, 尤其是对阻抗差异大的多物质厚靶的平面斜侵彻计算, 则仍然显得力不从心。

在三角形有限元算法与程序 LITZ-2D 的基础上, 我们从单元节点间的联系、滑移面处理、单元失效、网格剖分等几方面对程序进行了有针对性的改造与重新设计, 使这种拉氏算法同时又耦合兼备了欧拉算法的特点, 从而适应了对这类阻抗差异大的多物质厚靶平面二维斜侵彻的计算。并可用来换算成对应的 3D 问题的等效弹道迹线及等效扩孔面积, 从而可将 3D 侵彻问题用轴对称计算来近似处理, 以便在目前的计算机硬、软条件下, 也能方便、有效地解决这类难题, 并得到定性上合理、定量上适用的结果。

2 计算方法

2.1 守恒方程

LITZ-2D 以三角形有限元离散求解下列二维非定常拉氏弹塑性流体力学守恒方程组。按通常的符号约定, 可写为

$$\dot{V}/V = \partial u / \partial r + \partial v / \partial z + \alpha u / r \quad (1)$$

* 收稿日期: 2001-01-10; 修回日期: 2001-04-17

作者简介: 范中波(1938—), 男, 研究员。

$$\dot{u}/V = \partial\sigma_{rr}/\partial r + \partial S_{rz}/\partial z + \alpha(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})/r \quad (2)$$

$$\dot{v}/V = \partial S_{rz}/\partial r + \partial\sigma_{zz}/\partial z + \alpha S_{rz}/r \quad (3)$$

$$\dot{e}/V = -(p+q)\dot{V}/V + S_{rr}\dot{\epsilon}_{rr} + S_{\theta\theta}\dot{\epsilon}_{\theta\theta} + S_{zz}\dot{\epsilon}_{zz} + S_{rz}\dot{\epsilon}_{rz} \quad (4)$$

式中: $S_{ij} = \sigma_{ij} + (p+q)\delta_{ij}$; $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$; $i, j = r, \theta, z$; q 是人为粘性压力; $\alpha=0, 1$ 分别表示平面与柱对称情形。

2.2 本构方程

对金属, 采用流体弹塑性本构模型。其形状变形用增量形式的小弹塑性本构方程描述, 初始屈服满足最大变形比能屈服条件, 后继屈服采用计入时效、变形历史效应、压力硬化和热软化的等效强度模型, 损伤破坏采用积累损伤模型。体积变形用 Mie-Grüneisen 状态方程描述。对水, 采用流体本构模型, 即只需状态方程描述其体积变形。水的空化则采用 Bilinear Fluids 模型^[2]近似。据此, 可统一导出上述材料如下形式的本构方程。

2.2.1 偏应力

$$S_{ij} = FS_{ij}^0 \quad dS_{ij}^0 = \{2G[\dot{\epsilon}_{ij} - \delta_{ij}\dot{V}/(3V)] - \omega_j\} dt \quad (5)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} \dot{\epsilon}_{rr} = \partial u/\partial r, \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \alpha u/r, \dot{\epsilon}_{zz} = \partial v/\partial z, \dot{\epsilon}_{r\theta} = \dot{\epsilon}_{\theta r} = 0, \dot{\epsilon}_{rz} = (\partial v/\partial r + \partial u/\partial z)/2 \\ \omega_r = -\omega_z = -2\omega_{rz}^0, \omega_{\theta\theta} = \omega_{\theta\theta} = \omega_{zz} = 0, \omega_z = \alpha(S_{rr}^0 - S_{zz}^0), \omega = (\partial u/\partial z - \partial v/\partial r)/2 \end{cases}$$

$$F = Y/\sigma_{VM} \begin{cases} < 1 & Y < \sigma_{VM} \\ = 1 & Y \geq \sigma_{VM} \end{cases}$$

$$\text{Von Mises 等效应力} \quad \sigma_{VM} = \{3[(S_{rr}^0)^2 + (S_{zz}^0)^2 + (S_{rz}^0)^2 + S_{rr}^0 S_{zz}^0]\}^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{动态等效屈服强度} \quad Y = (C_1 + C_2 \epsilon_p^n)(1 + C_3 \ln \bar{\epsilon}(1 - \bar{T}^m) + C_4 p) \leq Y_{\max} \quad (7)$$

$$\text{等效应变率} \quad \bar{\epsilon} = \{2[(\dot{\epsilon}_{rr} - \dot{\epsilon}_{\theta\theta})^2 + (\dot{\epsilon}_{\theta\theta} - \dot{\epsilon}_{zz})^2 + (\dot{\epsilon}_{zz} - \dot{\epsilon}_{rr})^2 + 6\dot{\epsilon}_{rz}^2]\}^{1/2}/3 \quad (8)$$

$$\text{等效塑性应变率} \quad \dot{\epsilon}_p = d\epsilon_p/dt = (1 - F)\sigma_{VM}/(3Gdt) \quad (9)$$

$$\bar{T} = (T - T_H)/(T_m - T_H) \leq 1 \quad T = T_0 + e/c_p \quad (10)$$

式中: T_H, T_0 与 T_m 分别为室温、初温与熔化温度, c_p 为比定压热容, G 为剪切模量, Y_{\max} 为材料的最大屈服强度, C_1, C_2, C_3, C_4, m 与 n 均为材料常数。

2.2.2 流体静压力

$$p = (K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3)(1 - 0.5 \Gamma \mu) + \rho_0 e \Gamma(1 + \mu) \geq p_{\min} \quad (11)$$

式中: $\mu = (\rho/\rho_0) - 1 = (V_0/V) - 1$ 称为体积应变, ρ_0 与 p_{\min} 分别为材料的初始密度与金属能承受的最大负压或水的空化压力^[2], Γ 为 Grüneisen 系数, K_1, K_2 与 K_3 均为材料常数。

2.2.3 积累损伤模型与失效破坏判据

材料的损伤度 D 由材料的积累等效塑性应变与动态断裂应变 ϵ_f 之比来确定

$$D = \sum_i \dot{\epsilon}_p \Delta t / \epsilon_f \quad \epsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \bar{p})) (1 + D_4 \ln \bar{\epsilon}_p) (1 + D_5 \bar{T}) \geq \epsilon_{\min} \quad (12)$$

式中: $\bar{p} = p/\sigma_{VM}$, ϵ_{\min} 为材料的最小断裂应变, D_1, D_2, D_3, D_4 与 D_5 均为材料常数。

当 $D \geq 1$ 时, 材料完全损伤破坏, 对应单元的所有应力为零。

另外, 定义材料的失效压力 p_{fail} 与失效应变 ϵ_{fail} , 且规定

$$D = \begin{cases} D & -p < p_{\text{fail}} \\ \max(D, 1.0) & -p \geq p_{\text{fail}} \end{cases} \quad (13)$$

当 $\epsilon_p \geq \epsilon_{\text{fail}}$ 时, 材料失效破坏, 对应单元的所有应力与等效塑性应变率均为零。

上述本构模型中所含各材料的动态参数, 主要参照文献[3]选用, 但程序与参数均经调试与校正, 直至使正侵彻终点弹道的有关实测结果与 LTZ-2D 程序计算的结果相符后, 才用于斜侵彻计算。因此, 这

些模型不仅所考虑的物理因素较全面、实用,而且参数也较准确、可信。

2.2.4 程序特点及使用技巧

(1) LITZ-2D 是一个有限元拉氏程序,故适于计算复杂几何形状的多介质运动,能较准确地描述多物质界面和自由面的变化;

(2) 它具有各节点间可变的相邻节点联系,允许各界面间可侵蚀性地滑移,并以三角形剖分各网格单元,且各单元又具有从扭曲至失效的判断和处理能力,因此,也兼备了处理网格大变形计算的能力;

(3) 组装了考虑物理因素较全面的材料本构方程的子程序模块,使程序具备了对多相、多介质系统,经受大范围应力变化,产生大变形、相变及各种损伤破坏的强非线性弹靶高速碰撞动态响应全物理过程这类复杂问题进行模拟计算的能力;

(4) 当注意采用反畸变的网格剖分与排列技巧,并合理采用与不同阻抗的介质相匹配的网格尺度和侵蚀滑移特征参数的设计时,可极大减少初始设置的网格数,并尽可能减轻运动过程中网格的动态扭曲程度,适应对厚靶,尤其是阻抗差异大的多介质厚靶平面斜侵彻全物理过程的计算,能较好地解决其计算精度与速度的矛盾。

3 计算模型

高密度柱束软钢侵彻体长 $l_j=29.8\text{cm}$, 质量 $m_j=6.551\text{kg}$, 共具有 $e_j=34754.3\text{kJ}$ 的动能。其初始状态沿弹径向分布均匀。沿轴向的半径和速度按三段式线性分布: 即 $r(t_0, z)=r_a-r_b \times l_j(z)$, 当 $l_j(z) \geq 25\text{cm}$ (或 $\leq 5\text{cm}$) 时, $r_a=7.0808$ (或 5.4200) cm , $r_b=0.2208$ (或 0.3220), 当 $5\text{cm} < l_j(z) < 25\text{cm}$ 时, 则 $r_a=4.3725\text{cm}$, $r_b=0.1125$; $u(t_0, z)=u_a+u_b \times l_j(z)$, 当 $l_j(z) \geq 21\text{cm}$ (或 $\leq 6\text{cm}$) 时, $u_a=2.8550$ (或 1.2400) km/s , $u_b=0.1083$ (或 0.2533) $\times 10^5\text{s}^{-1}$, 当 $6\text{cm} < l_j(z) < 21\text{cm}$ 时, 则 $u_a=1.812\text{km/s}$, $u_b=0.1580 \times 10^5\text{s}^{-1}$, 初始压力及径向速度均为零, 初始密度 $\rho_0=7.85\text{g/cm}^3$, $G=80.17\text{GPa}$, $Y_{\max}=0.36\text{GPa}$, $c_p=452.56\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $T_m=1810.93\text{K}$, $\Gamma=1.69$, $p_{\min}=-1.85\text{GPa}$, $\epsilon_{\min}=0.03$ 。

初始为静止常态的多层厚靶, 由厚 2、1、200cm 的铝、钢、水层及 4cm 钢、6.2cm 空隙、3cm 钢、8cm 空隙、2cm 钢、8cm 空隙及 4cm 钢顺序排列组成(见图 1)。

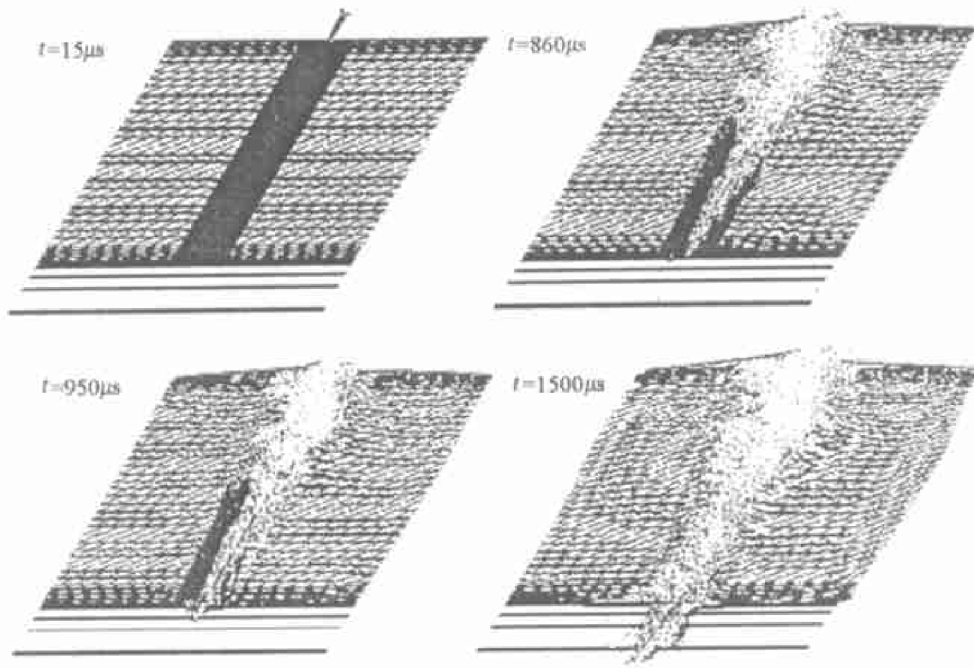


图 1 多物质厚靶斜侵彻的计算结果

Fig.1 Numerical results of oblique penetration into multilayer targets

我们进行了与上述聚能柱束的初始状态分布相同的平面侵彻体以 $\alpha=30^\circ$ 着靶时平面斜侵彻模型 (P1) 的模拟计算。为进行对比研究, 还进行了对应轴对称聚能柱束以 $\alpha=0^\circ$ 正着靶 (C1) 及考虑斜侵彻倾斜效应 (C2) 和倾斜叠加弯曲效应 (C3) 后, 按终点弹道轨迹加厚的等效轴对称柱靶模型的正侵彻模拟计算。

4 计算结果

斜侵彻与正侵彻一样, 弹体入水时, 其头部都要产生高压, 使水形成数百米每秒的径向开穴速度。穴外的水, 在自由面上迅速卸载、减压, 发生相变、空化, 使空穴的闭合减缓, 这就使弹体的侧面及尾部能在空穴中保持长时间的低阻运动, 如图 1 所示, 从而有利于对厚水层的深穿透; 而弹的头部则因直接受到靶的阻抗, 使其减速并在弹体中产生反向速度梯度, 所以, 弹头部要发生质量的堆积与墩粗, 如图 1 所示, 这有利于弹在出水后产生大孔径的穿靶。弹体穿靶的孔径基本与弹体在侵彻面处的动态头部速度和半径成正比^[4], 弹在入水前, 因头部速度大而可获得大的穿靶孔径, 出水后, 随弹体头部逐渐变粗而使四层间隙靶的孔径先是逐渐变大, 而后因速度急剧下降而变小 (见表 1); 弹体穿过靶后, 靶上的高压急剧下降, 从而使穿靶带来的轴向水流急速加速, 可达数百米每秒, 将造成穿靶后巨大的后效冲量破坏。

正、斜侵彻之间的主要差异是, 斜侵彻时弹体不对称受力, 因而导致终点弹道在倾斜中要逐渐发生弯曲, 孔截面也要变椭、长短轴之比变大。P1 模型的计算结果表明; 在斜侵彻初期, 因弹速与质量都较大, 而靶材 (水) 的阻抗又较小, 故弹的非对称受力与其惯性力相比依然不大, 所以, 弹在出水前, 弹道还不足以产生严重弯曲, 弹体仍基本沿 $\alpha=30^\circ$ 作倾斜直线运动 (见图 1); 而后期, 因弹体质量、动量均已消耗严重, 此时, 弹的非对称受力渐显重要, 因而, 开始产生既倾斜又弯曲的弹道 (见图 1)。弹在出水后侵彻四层间隙金属靶时, 其 α 依次递增至 31.00° 、 33.68° 、 36.40° 和 41.33° 。同时, 斜侵彻靶上的孔截面与正侵彻的圆截面不同, 应近似呈椭圆形, 其短轴与对应正侵彻孔径 ϕ 相近, 而平面斜侵彻 (P1) 计算得到的孔距 L_h (见表 1), 是斜侵彻孔截面中处在最严重非对称受力面内的椭圆长轴, 计算表明, 它与相应短轴之比 $K=L_h/\phi(C1_{LITZ-2D})$ 也随 α 增大而加大 (见表 1)。

利用 2D 平面斜侵彻计算得到垂直靶面的穿深 l , 弹道倾角 $\alpha(l)$ 及孔宽 L_h 和对应正侵彻孔径 ϕ , 则可近似得到对应 3D 问题的等效弹迹 $L(l)=l/\cos\alpha(l)$ 及等效扩孔横截面积 $S(l)=\pi L_h(l)\phi(l)/4$ 。

斜侵彻的这种弹道弯曲及扩孔效应, 最终都使其能耗比对应正侵彻加大, 因而, 弹速衰减更快, 沿垂直靶面方向侵彻深度下降或穿靶后剩余能量及后效威力减小。

其中, 弹在正、斜侵彻时孔截面由圆变椭圆扩孔后, 其单位穿深的能耗, 若用 Thomas 定常成坑率模型^[4]估计, 则应近似与 K 成正比。而椭圆的短、长轴则可分别由对应二维轴对称的正侵彻 (C1) 及平面斜侵彻 (P1) 的计算得到 (见表 1)。

斜侵彻弹道倾斜与弯曲效应的能耗增量, 可用按 $(\cos\alpha)^{-1}$ 因子加厚的等效靶模型 C2、C3 与未加厚的 C1 模型的弹的轴对称正侵彻的计算结果对比得到。计算表明, C1 在入水前的能耗只占弹总能的 1.54%, 在厚水层中为 44.55%, 出水后为 14.5%。仅考虑倾斜效应的 C2, 该三段消耗的能量分别比 C1 各对应段增加了 5.88%, 20.14% 和 45.66%。若同时再考虑弯曲效应的 C3, 则分别比 C1 各对应段增加了 6.05%, 26.15% 和 60.86%。其中, 侵彻后期因弯曲效应严重, 故能耗也增加最多。

此算例中, 弹的头部速度主要在侵彻厚水层中衰减。实验测出, 正侵彻 (C1) 时, 弹在水中的侵彻面

表 1 靶上的孔径 (或孔宽)

Table 1 Hole diameter (or width) on targets

材料	厚度/mm	孔径 ϕ /mm	
		C1 _{LITZ-2D}	P1 _{LITZ-2D}
H ₂ O	200		
Fe	40	150	175
Fe	30	160	192
Fe	20	180	223
Fe	40	70	93

速度 u_p 的实测结果与 P-E 侵彻理论结果之差小于 5%，仍基本符合随侵彻深度按指数衰减的规律。LTZ-2D 的计算与实测和 P-E 理论结果的差异，都在 12% 以内。斜侵彻时，按仅考虑倾斜效应的等效靶 (C2) 计算，其 u_p 的衰减就已明显比正侵彻时加快 (见表 2)，偏离 P-E 侵彻理论更远。这些结果，定性上合理，定量上适用。

斜侵彻比正侵彻能耗增加，速度衰减加快，则必然导致侵彻能力下降。此算例的斜侵彻虽然也能穿透厚水层后的四层间隙金属靶，但弹的剩余能量比正侵彻时下降了约 78.6%。

5 结 论

LTZ-2D 兼有拉氏与欧拉程序的双重优点，具有模拟聚能束流对阻抗差异很大的多介质间隙厚靶平面斜侵彻复杂问题全物理过程计算的能力。计算表明，斜侵彻时，因弹体非对称受力，故厚靶中的终点弹道在倾斜中要逐渐发生弯曲，孔截面变椭、 K 随 α 增大而增大。对厚靶，斜侵彻初期，正、斜侵彻差异只需考虑弹道倾斜效应， K 与 α 均基本为常值；后期则还必须考虑弹道弯曲效应， K 与 α 均逐渐增大；正侵彻的侵彻面及弹头部速度在厚靶中仍基本按 P-E 理论衰减，而斜侵彻时衰减则要加快，弹的能耗加大，尤其在侵彻后期则更为明显。

参考文献:

- [1] James S W, Charles E A, John P R, et al. A Short Course on Penetration Mechanics [M]. San Antonio: SRI, 1996, 676-729.
- [2] FAN Zhong-bo, LIN Zhong, LI De-qian, et al. The Numerical Study for Underwater Penetration of Spaced Target [A]. Michael J, et al. Proc the 14th Inter Symp on Ballistics [C]. Canada: CDPA, 1993, 2: 601-610.
- [3] Johnson G R, et al. User Instructions for the EPIC-2 Code [R]. AFATL-TR-86-51, Honeywell Inc Edina MN, 1986.
- [4] Thomas S. Analytical Model of Crater Formation by Jet Impact and Its Application to Calculation of Penetration Curves and Hole Profiles [A]. Hans P. Proc the 7th Inter Symp on Ballistics [C]. Hages, Netherlands: KIVI, 1993, 535-583.

Numerical Simulation of Plane Oblique Penetration into Multi-layer Target of Thick Water and Spaced Metals

FAN Zhong-bo, LI En-zheng, ZHANG Feng-guo, HAN Bing

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: 2D numerical simulation of plane oblique penetration gives terminal ballistic effect in severe asymmetric loading plane corresponding to 3D oblique penetration, and provides basic data for estimating the equivalent ballistic path and cross section area of the hole formed during 3D oblique penetration. But, for thick target, especially for the thick target of multiple materials with very different impedances, the calculation on plane oblique penetration is very difficult. With LTZ-2D code, the difficult problem was solved, and the qualitatively reasonable and quantitatively applicable results were obtained.

Key words: multilayer target; impedance; oblique penetration; numerical simulation

表 2 水中侵彻速度的衰减

侵彻深度 L_w/cm	侵彻速度 $u_p/(km/s)$		
	$C1_{P-E}$	$C1_{LTZ-2D}$	$C2_{LTZ-2D}$
0	4.43	3.91	3.90
12.5	3.63	3.36	3.35
49.0	2.74	3.06	3.05
98.0	2.23	2.47	1.97
147.0	1.96	2.11	1.77
183.5	1.83	1.99	1.67
196.0	1.79	1.96	1.60