

文章编号: 1001-1455(2001)02-0126-05

聚能装药侵彻钢板全过程的数值模拟

温万治¹, 恽寿榕², 赵衡阳², 张月琴³

(1. 北京应用物理与计算数学研究所计算物理实验室, 北京 100088;

2. 北京理工大学机电工程系, 北京 100081;

3. 华北工学院机电工程系, 山西 太原 030051)

摘要: 基于 MOCL(Mark on Cell Line)分界面跟踪算法,用二维多流体网格法的欧拉程序,数值模拟了锥形罩聚能装药侵彻钢板的全过程;与试验结果进行了比较,可以满足工程设计的需要。这种连贯性的模拟能力避免了数值计算中对射流的许多人为假定,对数值模拟串联战斗部的终点效应具有一定的实用价值。

关键词: 数值模拟; 聚能装药; 侵彻

* 中图分类号: O241.3 文献标识码: A

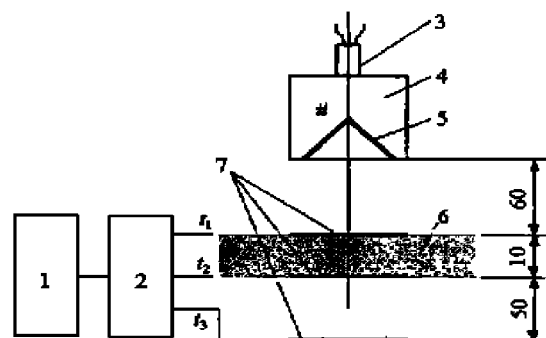
1 引言

Euler 方法能解决 Lagrange 方法所不能解决的材料大变形问题,但准确地跟踪分界面却成了 Euler 方法需要解决的问题。MOCL 技术^[1,2]的特点就是能够描述物体复杂的几何外形并跟踪其运动。在二维多流体网格法的 Euler 流体动力学程序中,应用 MOCL 新技术可跟踪物质的分界面和确定分界面网格的输运量。爆炸加载和高速侵彻现象都是具有大变形和扭曲问题,特别是具有薄壁结构物体的变形,最具典型的现象就是聚能装药中金属罩的压垮到形成射流的过程。文献[1]模拟了装有内锥角为 70°的变壁厚锥形钢罩的聚能装药形成射流的整个过程。

聚能装药侵彻的数值模拟往往是借助射流 X 光实验的测试结果把射流假定为具有一定速度梯度的高速动能杆来进行。而对射流各部分的密度、温度等,目前还没有相应的测试手段。因此,数值计算时对射流的假定加入了许多人为因素。我们在文献[1]工作的基础上,对聚能装药侵彻过程进行了试验和数值计算研究。连贯地使用同一程序模拟了从炸药爆轰到药型罩的压垮,从射流的形成到其拉伸过程,以及高速射流穿透 10 mm 厚钢板的全过程。并将计算结果与试验结果进行了对比。这样避免了对射流的许多人为假定和分级模拟。

2 聚能装药侵彻钢板的试验介绍

试验装置如图 1 所示。试验采用变壁厚锥形药型罩,材料为 45[#]钢,密度为 7.806 g/cm³,总质量为



1. Instantaneous recorder; 2. Tripping pulser;
3. Detonator; 4. Explosive; 5. Metal liner;
6. Steel slab; 7. Signal switch

图 1 聚能装药侵彻钢板试验装置示意图
Fig.1 Schematic of experimental
installation penetrating a steel slab

* 收稿日期: 2000-05-01; 修回日期: 2000-10-20

基金项目: 973 项目(J1999032801)

作者简介: 温万治(1966—),男,博士,副研究员。

14.889 g。炸药采用 8701 炸药, 药柱直径为 40 mm, 高为 41 mm, 平均密度 1.666 g/cm^3 。靶板为 10 mm 厚的 45[#] 钢板, 炸高为 60 mm。共安装了三组信号开关, 当射流头部到达时, 使其接通并记录信号。试验结果^[3]见表 1, 其中 D 表示孔径。表中记录时间是以雷管起爆时刻作为起始时刻, 靶板背面的鼓包造成 t_2 测试结果不稳定, 故舍弃。

表 1 聚能装药侵彻 10 mm 厚钢板试验结果

Table 1 Experimental data for penetration of 10 mm steel slab by shaped charge

序 号	$t_1/\mu\text{s}$	$t_3/\mu\text{s}$	$\Delta t_{13}/\mu\text{s}$	D/mm
1	17.9	38.5	20.6	8.5
2	19.7	40.4	20.7	8.0
3	17.8	37.1	19.3	8.0
平均值	18.47	38.67	20.2	8.17

3 全过程的数值模拟

选用二维多流体网格法的 Euler 流体动力学程序。程序中使用矩形 Euler 网格, 采用一阶精度的显式格式, 应用 MOCL 技术处理分界面。材料模型为理想流体弹塑性模型, 考虑热软化效应, 采用 Von Mises 屈服准则和压力瞬时破坏准则^[2]。流体控制方程组为不考虑外力、外源和热传导, 非守恒形式的 Euler 流体弹塑性动力学偏微分方程组^[2]。

3.1 网格线示踪点法(MOCL)简介

MOCL(Marker On Cell Line)方法^[1,2]是用于二维 Euler 程序的一种分界面跟踪算法, 是对 HELP^[3]程

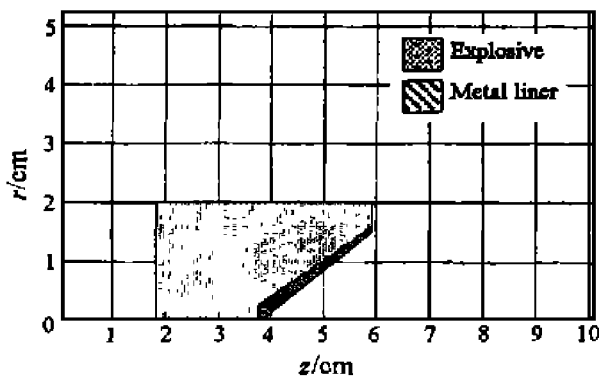


图 2 计算域初始场物质分布
Fig.2 Initial distribution of materials in the calculated range

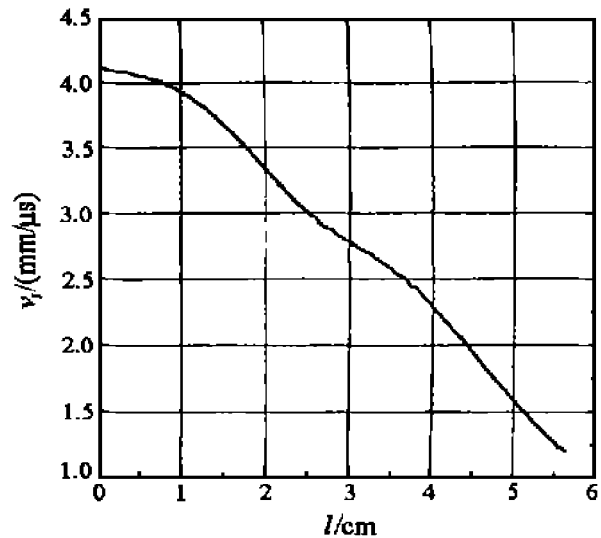


图 3 射流速度分布曲线
Fig.3 Velocity distribution of the jet

序中分界面处理方法的改进。其基本思想是在整个计算过程中, 对每种物质用一串首尾相接的线段链

(即示踪线)来逼近物质表面的曲线, 且每条线段的端点(即示踪点)均定义在网格线上; 根据网格中示踪线的位置来计算网格间材料的输运量。界面的移动是通过示踪点随当地物质移动来完成的, 新时刻示踪点是移动后的示踪线与网格线的交点。该方法规定物质内界面上的示踪点是重合的, 称为共示踪点。两种物质的相互侵蚀与分离由两物质的示踪点和共示踪点相互转化来完成。MOCL 方法与传统的用拉氏型示踪点跟踪界面比较, 具有逻辑关系简单、使用灵活、稳定等优点, 并能较清晰地描述分界面。将本算法加入原程序中, 主要是分界面定位和输运量确定的修改。

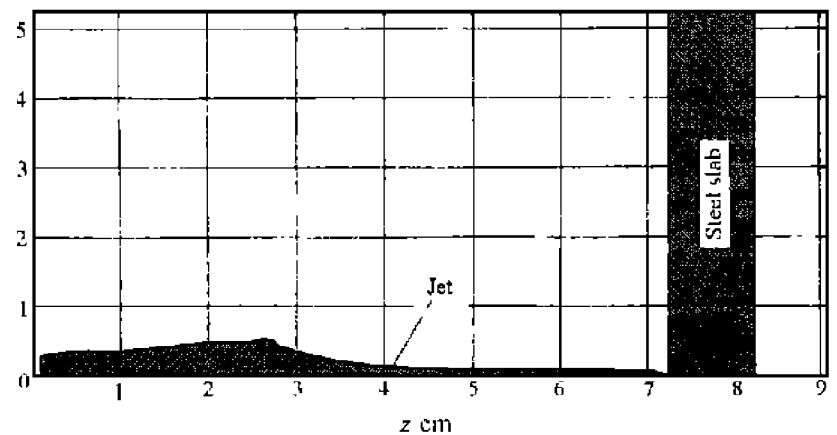


图 4 计算域再初始化场的物质分布
Fig.4 Distribution of materials in the re-initialized range

3.2 计算模型的建立

射流形成的数值计算过程包括成型装药的爆轰过程、药型罩的压垮、射流的初步形成以及射流的拉伸四个过程,这四个过程均可看作二维轴对称问题。文献[1]介绍了与图 1 中相同尺寸的聚能装药试验装置的 X 光试验和数值计算情况,射流侵彻的数值计算完全是在前面计算射流形成的基础上进行的。计算域中只包含两种物质,当射流头部到达靶板位置时,由于此时的爆轰产物对已形成的射流影响甚微,可将爆轰产物清除,而把靶板作为一种材料,按炸高的位置加入到计算域中。

计算域划分为(轴向 $z \times$ 径向 r) 220×100 个矩形网格,采用不等间距步长。径向 r 网格数 $j_m = 100, j = 1 \sim 60$ 的网格步长 $\Delta r_j = 0.03 \text{ cm}$; $j > 60$ 以后, Δr_j 按 10% 的幅度增加。轴向 z 网格数 $i_m = 220, i = 42 \sim 160$ 的网格步长 $\Delta z_i = 0.03 \text{ cm}$; $i < 42$ 以后, Δz_i 按 10% 的幅度增加; $i > 160$ 以后, Δz_i 按 0.002 cm 的增幅过渡到 0.05 cm 以后,则保持 0.05 cm 不再改变。计算过程中,计算域前移时,径向网格步长不再改变,而轴向移进的网格步长均为 0.05 cm。图 2 显示了计算域初始场的物质分布。

3.3 计算结果及分析

数值计算中,射流形成时爆轰产物的膨胀和药型罩和变形过程见文献[1]。这里只给出当射流头部到达距药型罩口部 60 mm 时的速度 v_j 的分布曲线(见图 3,其中横轴为射流自头部累加的长度)。从图中可以看出,从头部到尾部速度呈现出逐渐减小的趋势,且头部速度梯度较小,其它部分近似成线性变化,这和文献[5]中测得的射流速度分布规律一致。

当射流形成后,头部到达距药型罩 60 mm 时,把 10 mm 厚靶板加入计算域中计算,图 4 显示了计算域内物质分布。此时射流头部与靶板表面刚好点接触,射流头部速度为 4.135 mm/ μ s(见图 3)。图 5 显示了整个侵彻过程中靶板和射流变形

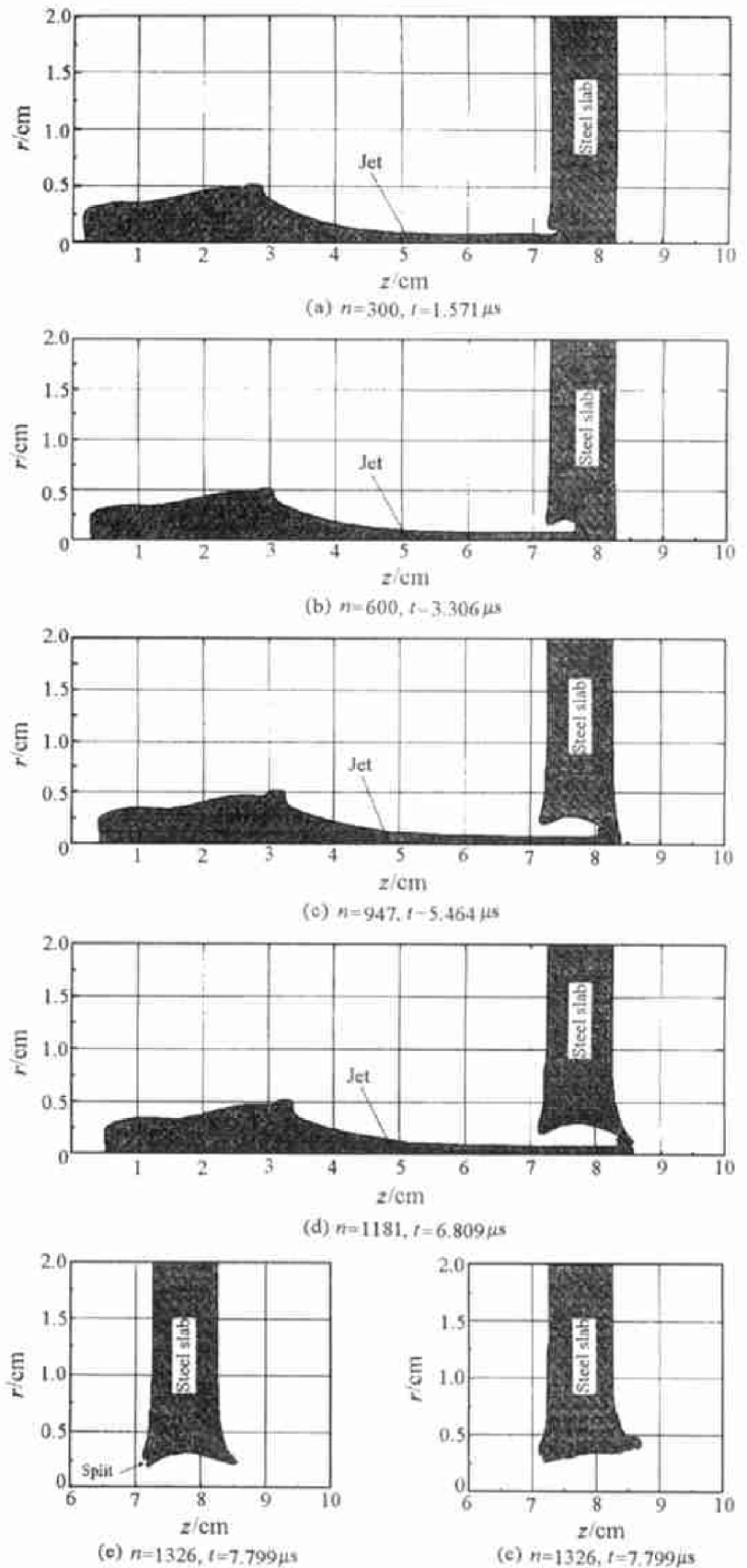


图 5 侵彻过程中靶板和射流变形过程示意图

Fig.5 Schematic of deformation process of the target and jet

的过程,其中 n 是计算循环步数; t 是计算时间。图 5(c)表示射流头部正好到达钢板背面初始位置的状态;图 5(d)表示钢板背面鼓包刚崩落的状态;图 5(e)和图 5(f)均表示破甲孔口的演变,从图 5(e)可看出出口部有裂口。图 6 给出了侵彻过程中射流头部速度 v_h 随位移 L 的变化曲线。

图 7 给出了射流头部位移 L 随时间 t 的变化曲线,从图中可以看出在 $t=5.464 \mu\text{s}$ 时,射流头部已侵彻到靶板的初始背面,但对照图 5(c)可以看出由于靶板背面的鼓起,此时仍未被穿透。在 $t=6.809 \mu\text{s}$ 时,靶板被穿透,鼓包崩落(见图 5(d)),此时射流头部位移为 13.3 mm。在 $t=7.462 \mu\text{s}$ 时,射流与靶板完全脱离。

当射流穿透靶板后,射流对靶已不起作用,但靶板孔周围的物质在惯性力作用下继续运动。到 $t=11.917 \mu\text{s}$ 时,靶板基本处于静止状态,破甲孔壁几乎不再变化,侵彻孔成形。图 5(f)显示了此时的靶板外形,可以看出孔口部和背部均出现翻唇。取此时整个直径的平均值作为孔径的最终计算值。与试验值相比较,孔径偏小,相对误差达 19.5%。主要原因:(1)由于射流撞击速度偏小;(2)碰撞后的射流本来在后续射流的推动下向四面扩散,其剩余的部分能量可扩大孔径,但由于网格分辨率低,以及 MOCL 算法的抹平效应,使这种作用减弱了许多。

表 2 给出了部分计算结果与试验结果的比较,其中 v_r 为射流出靶速度; t_p 为射流碰靶时间; Δt 为穿靶所需时间; D 为孔径。 v_r 的计算值取射流头部到达距靶板背面 25 mm 处的值(见图 6)。按照定常理想不可压缩流体力学理论^[6],参考靶板被穿透时射流头部位移的数值计算值,由试验结果(见表 1)估算试验的 Δt 为 $5.75 \mu\text{s}$,相应地估算出 v_r (靶板背面之后 50 mm 间的平均值)为 $3.232 \text{ mm}/\mu\text{s}$,以此与数值计算结果进行比较。同时表 3 列出了聚能装药形成射流的部分计算结果与试验结果^[1],其中 v_h 为头部速度; v_t 为尾部速度; l 为射流长度; d 为射流直径。

表 2 射流侵彻 10 mm 厚靶板计算结果与试验平均值比较

Table 2 Comparison of experimental data to calculated results on penetration

项 目	$t_p/\mu\text{s}$		$v_r/(\text{mm}/\mu\text{s})$		$\Delta t/\mu\text{s}$		D/mm	
	计算结果	试验结果	计算结果	试验估算值	计算结果	试验估算值	计算结果	试验结果
数 值	21.615	18.47	2.896	2.232	6.809	5.75	6.58	8.17
相对误差	17.0%		10.4%		18.4%		19.5%	

从整个对比来看,考虑到模拟射流形成的误差。侵彻的数值计算结果与实际还是比较吻合的。但从全过程来看,计算结果大部分偏小。作者认为除了计算误差外,在爆炸加载情况下,计算结果的精确程度要受到理想弹塑性模型给出的材料描述的情况的限制。

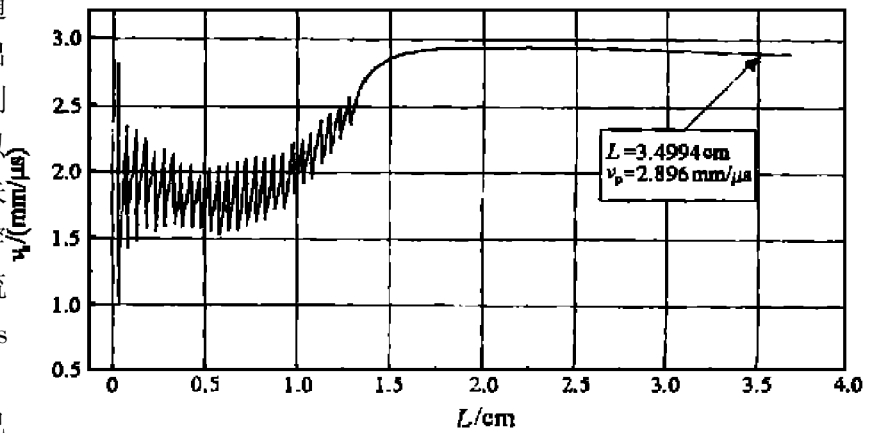


图 6 侵彻过程中射流头部速度随位移的变化曲线

Fig.6 The jet head velocity versus its displacement as penetrating

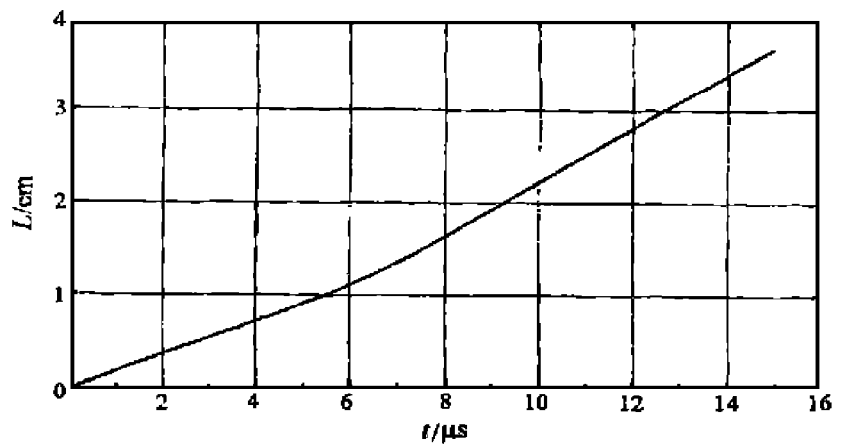


图 7 侵彻过程中射流头部位移随时间的变化曲线

Fig.7 The jet head displacement versus time as penetrating

表 3 射流形成的计算结果与试验平均值的比较

Table 3 Comparison of experimental data to calculated results on jet

项 目	$v_h / (\text{mm}/\mu\text{s})$		$v_t / (\text{mm}/\mu\text{s})$		l / mm		d / mm	
	计算结果	试验结果	计算结果	试验结果	计算结果	试验结果	计算结果	试验结果
数 值	4.088	4.625	1.078	1.010	55.25	59.67	2.22	2.23
相对误差	11.6%		6.7%		7.4%		0.4%	

4 结 论

MOCL 算法的引入使得药型罩的爆炸加载和高速射流侵彻靶体可作为一个总过程——从初始化的聚能装药到侵彻完成来模拟,避免了数值计算中对射流的许多人为假定。本算例表明全过程数值计算误差在 20% 以下,可以满足工程设计的需要,对数值模拟串联战斗部的终点效应具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 温万治, 恽寿榕, 赵衡阳, 等. 欧拉程序中描述分界面的网格线示踪点法 (MOCL)[J]. 兵工学报, 1999, 20(3): 212—216.
- [2] 温万治. 网格线示踪点法 (MOCL) 及其在数值模拟中的应用[D]. 北京: 北京理工大学, 1998. 15—39.
- [3] HEGEMAN L J, WALSH J M. HELP, A Multi-material Eulerian Program for Compressible Fluid and Elastic-plastic Flow in Two Space Dimensions and Time[R]. AD-726459. 1976. 38—57.
- [4] 彭金华. 高速碰撞的数值模拟实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1984.
- [5] HORNEMANN U, HOLZWARH A. Shaped Charge Penetration in Alumina Targets[J]. Int J Impact Engng, 1997, 20: 375—386.
- [6] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用(下)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 127—128.

Numerical Simulation for Penetration of a Steel Slab by a Shaped Charge

WEN Wan-zhi¹, YUN Shou-rong², ZHAO Hen-yang², ZHANG Yue-qin³

(1. Laboratory of Computation Physics, IAPCM, Beijing 100088, China;

2. Mechanical and Engineering Department, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. Mechanical and Engineering Department, North China Institute of Technology, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: Based on MOCL algorithm, the full process penetrating a 10 mm thick steel slab by a shaped charge is numerically simulated in a two-dimensional multi-material Eulerian code. The results are compared with the experimental data, which are able to be applied to engineering. The ability to coherently simulate the full process can avoid lots of artificial hypotheses to the jet in the numerical computation, and is of practical value to simulate numerically terminal effects of a series projectile.

Key words: numerical simulation; shaped charge; penetration