

穿爆弹撞靶效应数值分析

张德良 罗忠文 俞善炳 丁雁生 雍克明 李锦荣
(中国科学院力学研究所, 北京, 100080) (兵器工业总公司 213 所)

摘要 利用流体弹塑性模型和欧拉算法对穿爆弹撞击有限尺度模拟靶的力学效应进行了数值分析。计算详细地给出了撞靶过程中各物理量的变化, 分析了靶板尺度、撞靶速度对撞靶效应的影响。

关键词 高速撞击; 流体弹塑性模型; 数值模拟

穿爆弹撞靶过程和由此引起的起爆机理研究是研制武器中的一个重要课题。但由于撞靶过程仅几十微秒, 因此在实验中进行测量是十分困难的, 不能对撞击过程进行详细描述。本文利用流体弹塑性模型和欧拉算法对穿爆弹撞靶效应进行数值模拟, 详细描述了撞靶过程中各物理量的变化; 分析了不同尺度靶板对撞靶过程的影响; 给出了不同撞靶速度对破片引爆的影响; 探讨了破片对引信起爆的可能性。

1 数学模型和计算方法

用流体弹塑性模型来计算高速撞击现象, 在欧拉坐标系中忽略粘性, 热传导和热辐射效应^[1], 用来描述的基本方程组为:

$$\left. \begin{array}{l}
 \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, dv = \left. \begin{array}{l} \text{静水压效应 (ph1)} \\ \text{对流效应 (ph2)} \\ \text{应力偏量效应 (ph3)} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} - \int_S (\rho u_i) n_i \, ds \\ - \int_S (\rho u_i u_j) n_i \, ds \\ - \int_S (\rho u_i E_T) n_i \, ds \end{array} \right\} \\
 \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u_j \, dv = \left. \begin{array}{l} - \int_S p n_j \, ds \\ - \int_S (\rho u_i u_j) n_i \, ds \\ - \int_S (\rho u_i E_T) n_i \, ds \end{array} \right\} \\
 \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E_T \, dv = \left. \begin{array}{l} - \int_S p u_j n_j \, ds \\ - \int_S (\rho u_i u_j) n_i \, ds \\ - \int_S (\rho u_i E_T) n_i \, ds \end{array} \right\} + \int_S S_{ij} n_i \, ds + \int_S S_{ij} u_j n_i \, ds \end{array} \right\} (1.1)$$

式中 ρ 是密度; p 是静水压力; u_i 是介质运动速度; E_T 是比内能; S_{ij} 是应力偏量; n_i 是外法线方向。方程组把介质运动表示成静水压力效应, 对流效应和应力偏量效应三部分。在一定的本构关系和定解条件下求解方程组。

高速撞击现象中介质会出现大畸变, 采用欧拉算法是比较合适的。计算中差分格式用算子分裂思想建立。具体计算步骤: 一算静水压效应, 二算应力偏量效应, 三算对流效应。计算中同时对空间坐标 (轴对称坐标 r, z) 也进行分裂, 即把一个二维问题分裂成二个一维计算步来完成。为了记录界面运动状态, 计算中采用示踪点方法。

2 计算结果和分析

穿爆弹撞靶物理过程简化为如图 2.1 所示的穿爆弹头部和有限尺度模拟靶。

为了详细追踪撞靶过程中质点的运动，在靶板、风帽、盖板上设置示踪点 ($M + 1, M, M - 1$)，见图 2.2，以便追踪在撞靶过程中这些示踪点的位置变化。在撞靶过程中这些示踪点的位置如图 2.3 所示。

为了详细分析穿爆弹撞靶过程，计算了几种撞靶情况：弹以 600m/s 的撞击速度撞击有限尺度模拟靶和实用无限大靶；弹分别以 400, 800, 1 000m/s 的撞击速度撞击有限尺度模拟靶。

弹以 600m/s 速度撞击有限尺度模拟靶时，不同时刻 ($t = 0, 5, 10, 15 \mu s$) 的密度分布见图 2.4 (a), (b), (c), (d)。

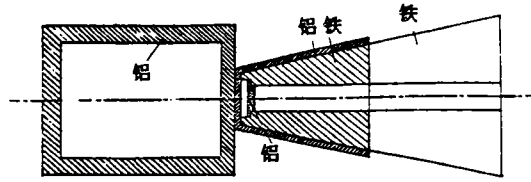


图 2.1 穿爆弹头部和有限尺度模拟靶
Fig. 2.1 Head of the penetrating projectile and simulation target with finite scale

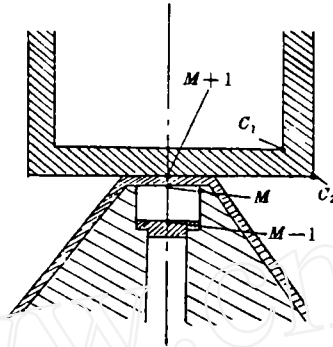


图 2.2 示踪点设置示意图
Fig. 2.2 Schematic diagram of markers

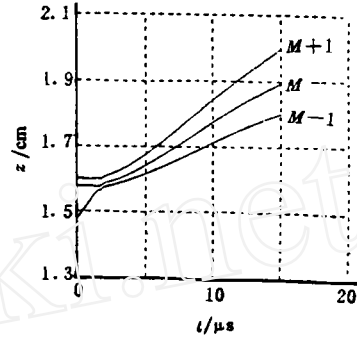


图 2.3 撞靶过程示踪点运动轨迹
Fig. 2.3 Motion trace of markers during the impact

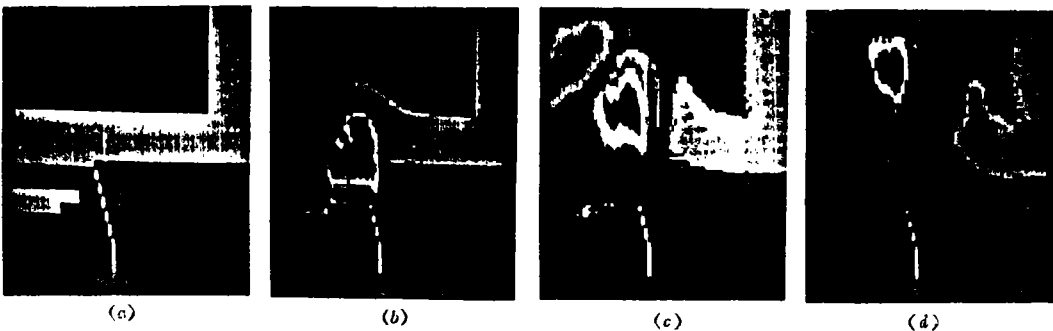


图 2.4 穿爆弹以 600m/s 的撞击速度撞击有限尺度模拟靶时，不同时刻的密度分布
Fig. 2.4 Density distribution at different time, when the impact of penetrating projectile with 600m/s on simulation target with finite scale

2.1 穿爆弹撞靶物理过程

(1) 风帽撞靶和切片形成

当弹以一定速度撞击靶板时，先是风帽与靶板相撞。这时在风帽和靶板内都会形成一道很强的冲击波，介质通过冲击波后产生很强压缩，见图 2.5。

由于风帽比靶板要薄得多，所以在风帽内传播的冲击波很快就传到风帽的自由边界，并在边界上反射一束稀疏波，稀疏波迅速返回，使介质卸压。同样，在靶板自由边界上反射的稀疏波也随后返回，使介质进一步卸压，并达到拉伸状态。但靶板和风帽交界面

处是不能受拉的,因而靶板和风帽会在拉伸作用下分离。

与此同时,在风帽的边缘处,风帽被弹颈支撑着(见图2.6)。弹颈有较高的波阻抗,碰撞的激波在这一部分界面反射的则是冲击波,因此风帽边缘部位受到的是压缩。这样,在风帽边缘和中间部位存在很强的速度差(当然也有压力差),产生很强的剪切过渡区,最终形成风帽切片。

(2) 弹颈部位的切割

弹在撞靶过程中,冲击波通过风帽传入弹的弹颈部位(我们把弹体AA线到BB线之间的部位称为穿爆弹的弹颈,见图2.6)。

计算中发现在弹颈部位全部裂开,形成弹颈的切片。这一断裂现象无论是有限尺度模拟靶,还是实用无限大靶;无论是撞击速度为600m/s,还是1000m/s,都可从照片上找到弹颈切片和弹颈断裂的痕迹,见图2.4(b)。这一现象已被实验证实。

(3) 盖板撞靶过程

风帽在撞靶和切割过程中,介质运动速度显然会因受阻而减缓。但放在弹颈部位的盖板将继续保持原有速度飞行,因此在某一时刻盖板必然会第二次撞击靶板,并获得一定撞击能量。当盖板以一定撞击能量去进一步撞击引信时,只要能量足够大,就可能触发引信起爆。因此,盖板的设计和盖板撞靶过程的控制对于改善穿爆弹性能十分重要。

(4) 靶板侵彻和冲塞现象

撞靶过程中弹的风帽、弹颈都会形成破片。与此同时,靶板本身也会在冲击波作用下压缩、变形、稀疏和剥离,不断被侵彻,最后形成冲塞现象。从图2.4(c)中可以清晰地看到靶板的被侵彻和冲塞特征。

2.2 靶板横向尺度效应

模拟靶和实用靶在横向尺度上差别较大,这种差别所引起的撞靶效应的差别到底有多大,是人们关心的问题。由于测量上的困难,完全靠实验是很难解答这个问题的。为此,我们专门设计了一组穿爆弹对有限尺度模拟靶和实用无限大靶的撞击的数值计算,计算结果这里从略。为了详细考察这两种靶板在边界上的撞靶效应,我们在两种靶的边界处的相同位置上设置了 C_1 和 C_2 两个示踪点(见图2.2),以便检验它们的差别。

具有600m/s撞击速度的弹撞击两种靶时,不同时刻中心示踪点 M 和边界示踪点 C_1 及 C_2 的位移 x ,压力 p 和速度 v 的最大值,列在表2.1中。

综合分析上述计算结果,可得结论:

(1) 计算结果表明,两种靶在总体上来说, p 、 x 、 v 值是基本一致的,特别是在中心线附近是完全一致的。但在边界点 C_1 和 C_2 附近这些值是有差别的,在模拟靶边界附近的

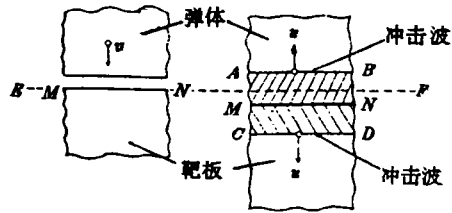


图 2.5 撞靶过程波系分析图
Fig. 2.5 Analysis of shock waves during the impact

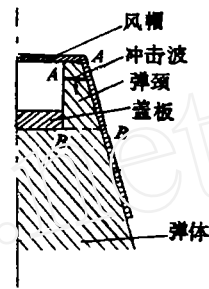


图 2.6 穿爆弹弹颈部位和激波传播示意图
Fig. 2.6 Schematic diagram of projectile neck and shock wave propagation

压缩性要比实用靶略大一些。

(2) 从表 2.1 数据分析, 中心点 M 的压力要比边界点明显高出一个量级。从数值分析可以看出, C_1 和 C_2 点的压力值仍然处于弹性区, 因此不会产生较大变形。由此可知, 弹以 600m/s 撞击速度撞击两种靶时, 力学效应基本一致, 在目前这种条件下, 靶板横向尺度对力学效应的影响不会太大。

2.3 撞击速度效应

我们分别对 400, 600, 800, 1 000m/s 撞击速度撞击有限尺度模拟靶的撞击过程进行数值计算, 计算结果列在表 2.2 和表 2.3 中。

综合分析上述计算结果可知:

(1) 撞击速度对 M 点的影响是明显的, 随着撞击速度的增加, 破片切割时间缩短, 破片飞行速度增加, 靶内压力值增加, 侵彻效应增强。

(2) 对 C_1 和 C_2 点, 撞击速度的增加对其压力、位移和速度影响不大, 这也表明了撞击过程中对 C_1 和 C_2 点来说侵彻效应已不起重要作用了。

2.4 破片引爆可能性

弹撞靶过程中将产生由风帽、弹颈被切割下来的破片。这些破片会再次撞击盖板, 使盖板会获得足够大的能量。当盖板再去撞击引信时, 将会引发爆轰。实验结果指出, 可能使引信起爆的实验条件为^[2]:

(1) 有风帽时破片为 90mg, 飞行速度 229m/s, 破片撞击能量为 1.8J。

(2) 有风帽时破片为 82mg, 飞行速度为 324m/s, 破片撞击能量为 4.2J。

表 2.1 穿爆弹撞击不同靶时的压力、位移、速度最大值

Tab. 2.1 Maximum values of pressure, displacement, velocity, when penetrating projectile impacts different target

靶型	示踪点	p /MPa	x /cm	v /m·s ⁻¹
模拟靶	M	4 000	0.34	300
	C_1	200	0	20
	C_2	150	0	-30
实用靶	M	4 000	0.34	240
	C_1	180	0.02	20
	C_2	140	-0.02	-20

表 2.2 不同弹速时 M 点的压力、位移和破片速度最大值

Tab. 2.2 Maximum values of pressure, displacement of the central marker M and fragment velocity with different projectile velocity

撞击速度 /m·s ⁻¹	p /MPa	x /cm	破片切割完成时间/ μ s	破片平均速度/m·s ⁻¹
400	2 100	0.24	3.5	217
600	4 150	0.34	2.5	353
800	6 000	0.37	2	531
1 000	11 000	0.48	1.4	631

表 2.3 不同弹速时 C_1 和 C_2 点的压力、位移和速度最大值

Tab. 2.3 Maximum values of pressure, displacement and velocity of the boundary marker C_1 and C_2 with different projectile velocity

示踪点	撞击速度 /m·s ⁻¹	p /MPa	x /cm	v /m·s ⁻¹
C_1	400	170	-0.013	18
	600	190	-0.07	20
	800	210	-0.008	17
	1 000	230	0.015	13
C_2	400	110	-0.005	-30
	600	80	0.005	-28
	800	70	0.005	-22.5
	1 000	90	-0.005	-21.5

(3) 无风帽时破片为 57.8mg, 飞行速度为 210m/s, 破片撞击能量为 1.25J。

上述实验结果表明, 当破片撞击能量大于 1.25J 时, 破片才可能使引信起爆。计算结果给出的不同撞击速度下的破片撞击能量列在表 2.4 中。

表 2.4 不同撞击速度下盖板获得的撞击能量

Tab. 2.4 Impact energy of the cap plate with different projectile velocity

撞击速度/ $m \cdot s^{-1}$	400	600	800	1 000
破片撞击能量/J	1.38	3.7	8.3	11.7

从表 2.4 可看出, 当弹撞击速度在 400~1 000m/s 之间时, 破片获得能量为 1.38~11.7J, 破片撞击引信是可能引爆的。而且, 当弹撞击速度达到 1 000m/s 时, 破片获得的撞击能量已大于最低引爆能量 (1.25J) 近 10 倍, 在这种情况下引信的设计要特别小心。

3 结论

(1) 穿爆弹撞击有限尺度模拟靶的过程有特征: 风帽撞靶和切片形成; 弹颈部位断裂; 盖板撞击和模拟靶被侵彻冲空现象。

(2) 在目前条件下, 靶板横向尺度对撞靶力学效应影响不大。用有限尺度模拟靶来代替现场实用无限大靶是可行的。

(3) 随着弹撞击速度的增加, 模拟靶中心部位撞靶效应明显增加, 而边界部位撞靶效应变化不明显。

(4) 弹撞击速度在 400~1 000m/s 范围内时, 破片触发引信起爆是可能的。

参考文献

- 谈庆明, 张德良. 计算弹塑性体运动数值模拟. 北京计算流体力学讨论会文集 (2), 1990
- 李锦荣. 机械引信侵彻机理模拟实验. 兵工学报火工品分册, 1980 (1)

NUMERICAL ANALYSES OF THE EFFECTS OF IMPACT OF A PENETRATING PROJECTILE ON THE TARGET

Zhang Deliang Luo Zhongwen Yu Shanbin Ding Yangshen

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Yong Keming Li Jingrong

(Research Institute No. 213, OIC)

Abstract Mechanical effects of impact of a penetrating projectile on the simulation target with finite scale are numerically analysed using the hydro-elasto-plastic model and Eulerian computational method. Effects of the various mechanical parameters when impacting the target are given. Influences of target scale and projectile velocity on the process of impacting the target are also discussed.

Key words high speed impact, hydro-elasto-plastic model, numerical simulation