

doi: 10.7690/bgzdh.2018.12.022

金属射流侵彻水介质间隔靶数值模拟

郭萌萌¹, 张玉令¹, 高泓超²

(1. 陆军工程大学石家庄校区弹药工程系, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 72428 部队, 山东 威海 264200)

摘要: 为解决大厚度均质靶存在的不足, 对金属射流侵彻水介质间隔等效靶进行研究。应用 AUTODYN 有限元软件对金属射流侵彻水介质间隔靶过程进行数值仿真, 建立射流侵彻的空气模型、水模型、间隔靶模型与金属射流相互作用的过程, 研究侵彻水介质间隔靶时金属射流射流速度的衰减规律, 并与空气介质间隔靶进行对比。结果表明: 水介质间隔等效靶对金属射流衰减效果较好, 可为设计水介质等效靶提供依据。

关键词: 金属射流; 水介质间隔靶; 侵彻; 数值模拟

中图分类号: TJ413⁺.2 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Metal Jet Penetration into Aqueous Medium Spaced Target

Guo Mengmeng¹, Zhang Yuling¹, Gao Hongchao²

(1. Department of Ammunition Engineering, Shijiazhuang Campus of PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 72428 Unit of PLA, Weihai 264200, China)

Abstract: For overcoming the shortcoming of large thickness homogeneous target, research on metal jet penetration into aqueous medium spaced target. The process of metal jet penetrating into aqueous medium spaced target was numerical simulated with AUTODYN. The interaction process among metal jet and air model, water model, spaced target model was established. On this base, velocity decay principle of metal jet penetrating into aqueous medium spaced target was investigated and compared with air medium spaced target. The results show that metal jet penetrating into aqueous medium spaced target can effectively decay the metal jet, and provide the basis for designing the aqueous medium spaced target.

Keywords: metal jet; aqueous medium spaced target; penetration; numerical simulation

0 引言

随着坦克及装甲车辆装甲厚度的不断增加和各种新型装甲的广泛应用, 现代坦克及装甲车辆的防护能力得到极大提高。在靶场进行反装甲弹药威力试验, 尤其是今后将要大规模开展作战试验时, 由于新型装甲如反应装甲和复合装甲的材料昂贵, 不可能全部使用反应装甲靶和复合装甲靶进行实弹试验, 现在一般使用均质靶板作为目标靶进行射击。但是随着破甲弹威力的提升, 对威力验收时被侵彻均质靶板的厚度要求不断提高, 而制造大厚度的均质靶板对技术要求高, 花费大, 浪费严重^[1]。为了解决这一问题, 需要寻找一种替代大厚度均质靶的等效靶板, 从而降低破甲弹威力试验成本, 节约试验经费, 减少人力和物力浪费; 因此, 国内外学者围绕该问题展开了研究^[2-6], 其中, 间隔等效靶是主要的研究方向之一。笔者利用数值仿真的手段对金属射流侵彻水介质间隔等效靶进行研究。

1 模型构建

图 1 为聚能装药数值仿真模型结构。模拟计算时, 采用 3 维模型和六面体网络单元格, 在炸药和药形罩周围包围一层空气以描述炸药爆炸后在空气中的传播。为提高计算速度, 采用空间 1/4 建模。

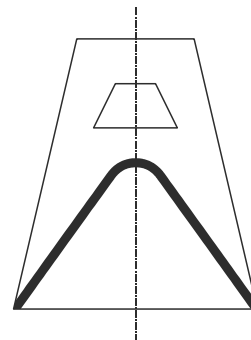


图 1 聚能装药通用结构

靶板单元采用拉格朗日 (Lagrange) 算法, 其他单元采用欧拉 (Euler) 算法, 射流对靶板的侵彻采用任意拉格朗日欧拉 (ALE) 算法。由于采用 ALE 算法时, 物质在网格内流动, 所以在炸药和药形罩可能

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-11-08

作者简介: 郭萌萌(1983—), 男, 山西人, 硕士, 参谋, 从事弹药技术保障研究。

到达之处必须建立网格。用空气网格将聚能装药包围，形成供金属射流材料流动的网格，在空气外表面建立无反射边界。

2 材料模型

2.1 炸药

炸药采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 本构模型，需要输入的参数有：材料质量密度 RO；炸药爆速 D ；Chapman-Jouget 压力 PCJ，体积模量 K ；剪力模量 G ；屈服应力 SIGY。AUTODYN 软件是无单位软件，因此，需要根据模型确定长度、质量和时间的单位，其他单位由这 3 个基本单位导出。

描述炸药压力和比容关系的状态方程有 EOS_JWL 和 EOS_JWLb。JWL 状态方程为

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

EOS_JWLb 状态方程是在 EOS_JWL 状态方程基础上添加指数变化而来，能更好地描述爆炸压力高于 Chapman-Jouget 状态的高压区。方程形式为：

$$P = \sum_{i=1}^5 A_i (1 - \frac{\lambda}{R_i V})e^{-R_i V} + \frac{\lambda E}{V} + C(1 - \frac{\lambda}{\omega})V^{-(\omega+1)},$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^5 A_i (A_{\lambda i} + B_{\lambda i})e^{-R_i V} + \omega \quad (2)$$

式中： p 为爆轰压力； E 为单位体积内能； V 是相对体积； ω 、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 为材料常数。炸药为黑梯混合炸药，输入的参数： A 为 3.71×10^{11} ， B 为 3.231×10^9 ， R_1 为 4.15， R_2 为 0.95， ω 为 0.30，初始相对体积 V_0 为 1.0，初始内能 E_0 为 7.0×10^9 J。

2.2 空气

空气模型由 2 部分组成^[7]：第 1 部分定义空气材料的本构，第 2 部分是空气状态描述方程。第 1 部分采用 NULL 材料描述空气本构，所需输入参数有：材料的质量密度 RO，压力截断值(永远小于 0)PC。压力截断值用来对单位扩张的应力值进行重新设置，对流体而言，材料的压缩行为容易由试验测得，但是其扩张的特性很难从试验中获得，因此假设其值为负值(相对于大气压力)。MU 为动态黏滞系数， μ 为 TEROD， V_0 为相对体积。

第 2 部分用 LINEAR_POLYNOMIAL 方程描述空气状态。方程的形式为

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2)E_0 \quad (3)$$

其中：

$$\mu = (\frac{1}{\gamma} - 1) \frac{\rho_{current}}{\rho_{initial}} E_0;$$

$$E_0 = \rho_{initial} C_v T_0.$$

式中： $\rho_{current} / \rho_{initial}$ 为相对密度； γ 为空气比热(取 1.4)； μ 为动态黏性系数； E_0 为单位体积的初始内能； $\rho_{initial}$ 为空气初始温度； $\rho_{current}$ 为当前空气密度； C_v 为空气定容比热(0.716 5 kJ/(kg·K))； T_0 为空气初始温度^[8]。

2.3 铜制药形罩

紫铜的材料模型选择 MAT_JOHN_COOK，状态方程为 EOS_GRUNEISEN，表 1 为材料模型和状态方程中的参数取值。

表 1 铜的材料模型和状态方程参数

RO/(g/cm ³)	G/GPa	A	B	N	C
8.9	0.77	7.92E-3	5.10E-3	0.26	1.40E-2
EPSO	CP	PC	M	T _M /K	T _R /K
1.00E-4	4.77E-4	-9.00	1.03	1.79E3	294
SPALL	D ₁	C	S ₁	GAMAO	A
3.00	0.8	0.46	1.49	2.17	0.46

2.4 水

水采用 NULL 材料的模型，状态方程选用 EOS_GRUNEISEN 加以描述，NULL 材料模型和状态方程一起使用。在状态方程中定义压缩材料的压力为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{v_0}{2}) \mu - \frac{a}{2} \mu^2]}{[1 - (S_1 - 1) \mu + S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (4)$$

定义膨胀材料的压力为

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (5)$$

式中： C 为 $\mu_s - \mu_p$ 曲线的截距； S_1 、 S_2 、 S_3 是 $\mu_s - \mu_p$ 曲线斜率的系数； γ_0 是 Gruneisen 常数； a 是对 γ_0 的 1 阶体积修正； $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ 。具体输入参数见表 2。

表 2 水的状态方程参数

C	S ₁	S ₂	S ₃	γ_0	a	E
0.1647	1.921	-0.096	0.0	0.35	3.0	2.895E-6

3 数值模拟研究

用 50 mm 口径的聚能装药为研究对象，通过数值仿真研究其对水介质间隔靶的侵彻规律。聚能装药为聚奥-8，药形罩锥角为 46°，口径为 50 mm，高度为 100 mm，无壳体。采用单点起爆，炸高为 90 mm，靶板间隔距离为 100 mm，靶板厚度为 4 mm，间隔介质为水。仿真模型如图 2 所示。

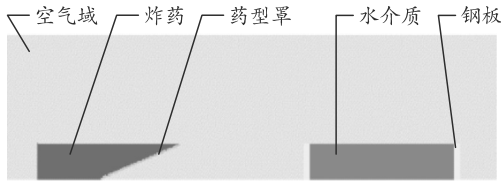


图 2 金属射流侵彻间隔靶仿真模型

炸药从 0 s 起爆开始模拟计算，到 100 μ s 结束，得到从炸药起爆、空气冲击波形成、药型罩压垮、射流运动和侵彻水介质间隔靶全过程模拟计算结果。图 3—6 依次给出了射流侵彻 100 mm 水介质层过程中，刚进入水中时刻、在水中运动一段距离时刻、刚穿透第 2 层靶板的时刻、射流头部完全穿过间隔靶后 4 个时刻的仿真图像，以及此时刻头部的速度曲线，其中速度曲线横坐标为射流头部从计算时刻开始的一段射流长度。

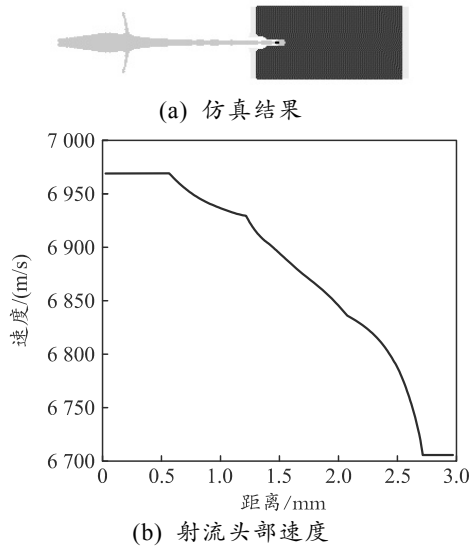


图 3 31 μ s 仿真结果和射流头部速度

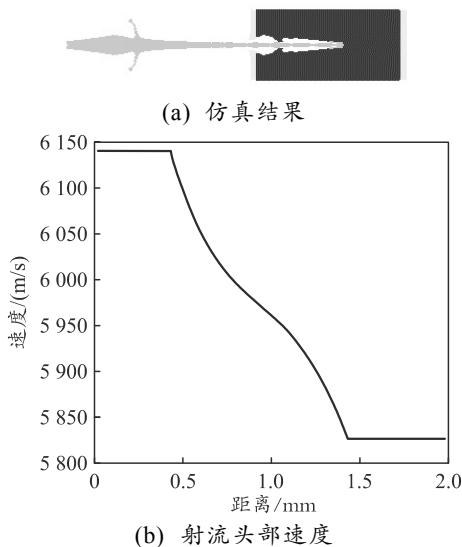


图 4 39 μ s 仿真结果和射流头部速度

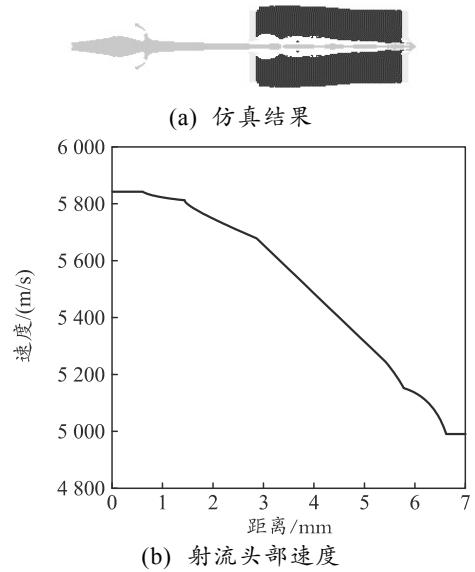


图 5 50 μ s 仿真结果和射流头部速度

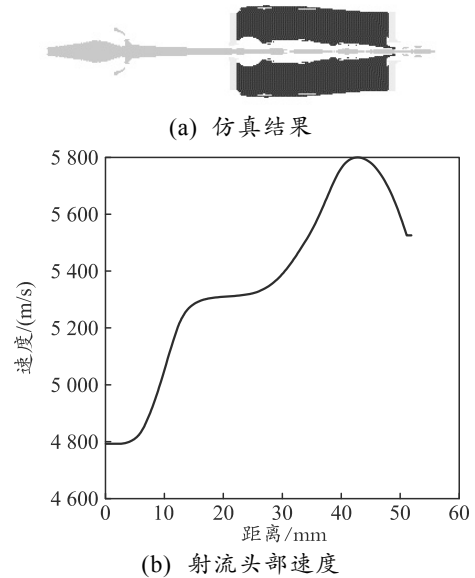


图 6 54 μ s 仿真结果和射流头部速度

从图 3 可知：在刚刚穿透第 1 层钢板进入水介质时，射流头部速度为 6 900 m/s 以上，开始侵彻水介质后，射流头部速度急剧下降。在图 4 中：射流已经在水中侵彻了一段距离，射流速度下降缓慢，由于射流的高速高温，水被迅速挤开，形成空腔。当射流穿过第 2 层钢板后，由图 5 可以看出：射流头部速度降低到大约 5 800 m/s，比入射时射流速度大大降低，可见水介质间隔靶对射流有明显的干扰作用。图 6 中：射流头部已经完全通过间隔靶，射流头部速度基本稳定在 5 200 m/s 左右，同时在间隔靶内部有大量的空腔存在，间隔靶的干扰射流开始断裂。

数值仿真得到的金属射流侵彻不同间隔距离下

水介质间隔靶不同时间点的速度及结果如表 3。从表中可以看出：靶板间隔距离越大即水介质层越厚，金属射流衰减的幅度就越大。

表 3 金属射流侵彻水介质间隔靶不同时间点的速度 m/s

间隔距离/mm	$t_1=31 \mu s$	$t_2=39 \mu s$	$t_3=50 \mu s$	$t_4=54 \mu s$
100	6 970	6 438	5 847	5 253
150	6 956	6 190	5 430	5 045
200	6 965	5 850	5 070s	4 826

对不同时刻金属射流头部速度数据进行拟合，得到射流侵彻水介质间隔靶时的射流头部速度变化曲线，拟合公式为

$$v_j = 1.8277h^2 - 197.5667h + 1.1076 \times 10^4 \quad (6)$$

式中： h 为间隔靶的长度； v_j 为射流的剩余速度。

为了增加对比性，将间隔介质直接换成空气进行金属射流侵彻数值仿真，得到基于空气介质和水介质的侵彻间隔靶金属射流头部速度变化趋势图，见图 7。

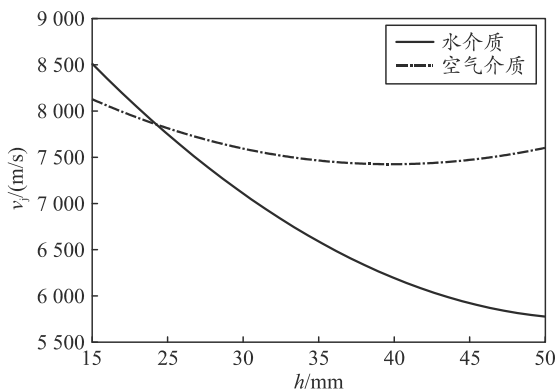


图 7 射流头部速度拟合曲线

由图可以看出：相对于空气介质，基于水介质的间隔等效靶对金属射流衰减效果非常好。金属射流头部速度与侵彻深度的关系可以用一元二次方程式来表示，即探讨水介质间隔靶作为反装甲弹药威力试验对象是可行的。

4 结束语

笔者基于软件的功能分析和算法，结合聚能装药金属射流形成和侵彻特点，确定了金属射流侵彻相关材料的模型和算法，并基于典型聚能装药结构建立了金属射流侵彻间隔靶的有限元模型。利用 AUTODYN 软件对金属射流侵彻水介质间隔靶过程进行数值仿真，研究了不同间隔距离下间隔靶对金属射流侵彻的影响规律，得到了金属射流头部速度衰减规律，并与空气介质间隔靶进行对比，得出基于水介质的间隔等效靶对金属射流衰减效果较好，可为进一步设计水介质间隔靶提供依据。

参考文献：

- [1] 陈威. 聚能射流侵彻下舰船钢与均质钢的等效关系[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(2): 45-48.
- [2] 孙华. 低密度射流对带壳装药穿而不爆的数值研究[D]. 太原: 中北大学, 2007: 1-8.
- [3] 董旭意. 反应装甲对射流的干扰机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 1-6.
- [4] BOURGET D, BAILLARGEON Y, Northrop S. Witness Pack. Calibration for Human Vulnerability Assessment[C]//20th International Symposium on Ballistics(II). Florida: American, 2002: 52-57.
- [5] 赵国志. 动能弹对装甲目标毁伤评估的等效靶模型[J]. 南京理工大学学报, 2003, 27(5): 509-514.
- [6] 何春霞, 王耀华, 王伟策, 等. 不同材料抗金属射流性能的试验研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 238-242.
- [7] 蔡军锋, 易建政, 刘国庆, 等. 弹药洞库内爆毁伤特性数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 751-755.
- [8] 刘国庆, 蔡军锋, 易建政, 等. 截面形状对洞库内爆冲击波流场影响的数值模拟研究[J]. 河北工业科技, 2009, 26(1): 8-11.