高速侵彻弹体熔化质量侵蚀的数值模拟研究

马天宝^{①*}, 王志华^②

① 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

② 太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所, 材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 太原 030024

* E-mail: madabal@bit.edu.cn

收稿日期: 2015-12-02; 接受日期: 2016-01-29; 网络出版日期: 2016-03-22

国家自然科学基金(批准号: 11390363, 11372046)资助项目

摘要 将质点映射算法嵌入自主开发的 MMIC-2D 欧拉型爆炸与冲击问题数值模拟程序中, 并在计算程序中加入基于熔化热熔融理论的质量侵蚀模型. 利用该程序对弹体高速侵彻混凝土靶板问题进行了数值模拟研究, 将数值模拟结果与相关实验数据进行了对比, 并对侵彻速度、弹体头部系数等影响侵彻性能和弹体质量侵蚀的相关因素进行了分析.

关键词 数值模拟, 质点映射算法, 混凝土, 高速侵彻, 质量侵蚀

1 引言

随着现代武器的不断发展, 许多重要的军事目标纷纷被转移到地下以避免受到打击. 为了对深埋在地下的军事目标进行有效打击, 对动能弹的侵彻速度提出更高要求. 通过大量的试验研究发现, 动能弹侵彻速度在 800 m/s 以内, 弹体的质量损失较小, 形状变化不大, 可以忽略弹体质量损失和形状改变对侵彻效应的影响; 随着侵彻速度增加, 当速度大于 1200 m/s 时, 弹体伴有明显的质量侵蚀, 将导致弹体形状改变和弹道偏离^[1,2], 影响弹体的侵彻效率. 因此对弹体高速侵彻过程中的质量侵蚀进行研究对于提高弹体侵彻效能十分必要.

国内外学者对高速侵彻过程中弹体质量侵蚀的原因和弹体形状变化规律进行了大量的探究, 取得

了一定的成果. 20 世纪 90 年代, 以美国圣地亚实验室 Forrestal 和 Piekutowski^[3]为代表的学者, 开展了一系列卵形弹高速侵彻混凝土的试验, 对弹体侵彻混凝土靶板前后弹体质量损失和形状改变进行了统计分析. 何丽灵等人^[4]对侵彻后的弹体的金相分析, 观察到高温热影响区和绝热剪切带. 虽然靶板骨料切削也会造成弹体质量损失, 但若弹体材料硬度远高于靶板材料时, 可以忽略靶板骨料的切削作用造成的质量损失. 武海军等人^[5]也开展了侵彻混凝土试验, 认为导致弹体在侵彻过程中发生质量侵蚀的主要原因是混凝土靶板的切削作用.

针对动能弹高速侵彻过程中弹体的质量侵蚀效应, 国内外学者基于试验结果, 结合理论分析, 建立了若干弹体质量损失的表征模型. Silling 和 Forrestal^[6]根据圣地亚实验室卵形弹侵彻混凝土靶板试验结果,

引用格式: 马天宝, 王志华. 高速侵彻弹体熔化质量侵蚀的数值模拟研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 387–392

Ma T B, Wang Z H. Numerical study on mass loss of high velocity penetration projectiles due to melting (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 387–392, doi: 10.1360/N092016-00002

通过拟合试验数据总结出弹体质量损失的表征模型. 该模型从形式上看, 认为弹体在侵彻过程中的质量损失与弹体的动能变化关系紧密, 但未具体指出质量损失如何随着能量耗散而变化, 缺乏基础物理理论的支撑. Jones 等人^[7]在对侵彻后弹体展开金相分析的基础上, 假设造成弹体的质量损失的原因是弹靶相互作用产生的摩擦功全部转化为热量作用于弹体表面, 使得弹体表层金属材料熔化, 由于运动在弹体侵彻过程中脱落, 根据这一假设, 建立了 Jones 模型.

弹体高速侵彻过程中质量侵蚀十分复杂, 在数值模拟时需要建立相应的数值模型表征弹体质量侵蚀规律. Beissel 和 Johnson^[8]提出了一种用于描述二维轴对称弹体质量侵蚀的表征模型, 通过将上述表征模型嵌入到拉格朗日有限元程序, 对弹体高速侵彻过程进行数值模拟, 并重点关注了弹体的质量损失和弹体头部形状的变化. Silling 和 Forrestal^[6]提出利用弹体表面回退速度对弹体高速侵彻过程中质量损失进行描述, 并对 CTH 欧拉计算程序^[9]进行了二次开发, 将其建立的表征模型嵌入到计算程序中. 该模型虽然形式比较合理, 计算结果也与试验吻合良好, 但需要侵彻试验数据拟合参数, 对于不同的弹体和靶板拟合的参数将不再适用, 不能简单推广使用.

本文通过对自主开发的 MMIC-2D 二维爆炸与冲击问题计算程序进行改进和扩展, 加入了质点映射算法和质量侵蚀模型, 对弹体高速侵彻混凝土靶过程中的质量侵蚀问题开展了数值模拟研究.

2 数学模型及数值计算方法

2.1 守恒方程

计算程序 MMIC-2D 中的守恒方程组采用欧拉坐标下的非守恒形式的质量、动量及能量守恒偏微分方程组^[10]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot (\nabla \mathbf{u}) \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}; \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla e \right) = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}. \quad (3)$$

2.2 质点映射算法

采用质点映射算法^[11]对多物质界面进行处理, 质点映射算法采用带有矩形影响域的质点代替质点网格法中的质点, 根据质点影响域移动前后与网格之间的重叠面积关系计算物理量在网格间的输运, 如图 1 所示. 质点映射算法继承了质点网格法能够清晰显示物质界面的优点, 使得计算过程中输运量的计算更准确, 平滑了质点网格法带来的数值波动.

2.3 质量侵蚀模型

侵彻过程中, 弹靶接触面在高速相对运动中发生剧烈摩擦, 弹体与靶板颗粒的磨擦作用使得弹体表面温度升高, 弹体表面材料发生熔化脱落, 弹体表面被磨蚀. 忽略靶板材料颗粒对弹体的切削作用,

图 1 (网络版彩图)质点影响域移动前后与网格之间的重叠面积示意图

(a) 质点移动前; (b) 质点移动后

Jones 等人^[7]作出如下假设: 弹体与靶板相互作用产生的摩擦功转化为热量并完全作用于弹体; 弹体侵彻过程中的质量损失全部来源于弹体头部表面材料的熔化脱落, 建立起弹体质量损失的热熔化模型. 主要计算过程如下:

$$f = \mu p + \tau_0, \quad (4)$$

$$W_t = - \iint_{z, A} f \cos \theta dA dz, \quad (5)$$

$$\Delta m = \rho \Delta V = W_t / \kappa \int C_p dT, \quad (6)$$

式中, f 表示表面单位面积摩擦力, W_t 表示摩擦功, Δm 表示损失质量. Forrestal 等人^[12]结合空腔膨胀理论将侵彻过程中弹体表面压力表示为

$$p = R + \rho_t v^2 \sin^2 \theta, \quad (7)$$

式中, $R = S f_c$, $S = 82.6(f'_c)^{-0.544}$; ρ_t 为靶体密度; v 为瞬时侵彻速度; R 为靶动态抗压强度, θ 为头部切线与弹体轴线夹角(图 2).

计算程序中将质量损失的计算离散成计算边界质点每一时间步损失的质量之和(图 3):

$$\Delta m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N f \cdot A_z \cdot d_{ji} / \kappa Q. \quad (8)$$

2.4 弹靶材料模型及参数

弹体材料选用 4340 钢, 材料参数如表 1 所示. 混凝土材料的 HJC 本构模型^[13]分三阶段的状态方程描述混凝土的力学行为, 能较准确地描述冲击载荷下混凝土的力学行为, 利用累积损伤失效模型描述混凝土材料的损伤断裂问题. 利用下式对混凝土的屈服准则进行描述:

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*), \quad (9)$$

图 2 侵彻过程参数计算模型示意图

图 3 质量损失计算模型示意图

式中, σ^* 为正规等效应力, P^* 为实际等效压力, D 表示损伤因子. 损伤因子 $D(0 \leq D \leq 1)$ 表示为

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f}, \quad (10)$$

式中, $\Delta \epsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别表示等效塑性应变增量和塑性体积应变增量, $\epsilon_p^f + \mu_p^f$ 表示压力 P 作用下断裂塑性应变, 计算公式如下:

$$\epsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2}. \quad (11)$$

当 $P^* > -T^*$ 时, 混凝土材料不能承受任何塑性应变, 材料发生瞬时拉伸破坏, $D=1$. HJC 模型参数如表 2 所示.

3 弹体高速侵彻混凝土靶的数值模拟

3.1 计算结果与实验数据对比

美国圣地亚实验室开展了一系列弹体侵彻混凝土靶的实验研究^[14]. 本文建立与实验工况相同的计算模型开展了数值模拟研究.

从表 3 和 4 的数值模拟和实验结果对比可以看出, 数值模拟得出的侵彻深度稍大于侵彻实验的统计结果, 弹体的质量损失也稍大于实验结果. 总体上通过数值模拟得到的侵彻深度和质量损失与实验结果基本吻合, 计算结果较为准确.

3.2 速度对侵彻过程的影响规律研究

为了利用数值模拟的方法研究侵彻速度对侵彻

表 1 4340 钢材料参数

材料	ρ (g/cm ³)	G (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	C	γ	n
4340 钢	7.85	77	0.79	0.51	0.014	1.73	28

表 2 混凝土 HJC 本构模型材料参数

ρ	G	A	B	C	N	f_c	T	$\varepsilon_{f\min}$	$S_{\max}$
2.4	0.1486	0.79	1.60	0.007	0.61	4×10^{-4}	5.84×10^{-5}	0.01	7
P_{crush}	P_{lock}	μ_{crush}	μ_{lock}	D_1	D_2	K_1	K_2	K_3	f_s
1.6×10^{-4}	0.008	0.001	0.1	0.04	1	0.85	-1.71	2.08	0.4

表 3 侵彻深度对比

速度(m/s)	仿真结果(cm)	实验结果(cm)	误差(%)
442	30.2	28.7	5.2
610	52.1	49.1	6.1
815	87.9	84.0	4.6
1009	135.7	130.0	4.4

表 4 质量损失对比

速度(m/s)	仿真结果(%)	实验结果(%)
442	0.99	0.81
610	1.67	1.55
815	2.98	2.69
1009	4.07	3.52

过程的影响规律,建立了如图 4 所示计算模型,弹体长度 $L=100$ mm,弹体直径 $d=20$ mm,头部系数 $CRH=2.5$.靶板厚度为 300 mm,半径为 100 mm,材料参数与上述相同.分别对弹丸初始速度为 800, 900, 1000, 1100 及 1200 m/s 侵彻混凝土靶板过程进行了数值模拟.其中侵彻速度为 1000 m/s 的模拟结果如图 5 所示.

从表 5 的数值模拟结果可以看出,随着初始侵彻速度的增加,弹体穿过混凝土靶板时的剩余速度越大,侵彻速度的增加对弹体的侵彻能力产生显著影响.动能弹初始侵彻速度越大,侵彻能力越强,提高钻地弹的初始速度有利于增强钻地弹的钻地效能,但是弹体在侵彻过程中受到的阻力也相应变大,同时弹体头部质量损失也相应增加.

3.3 弹体头部系数对侵彻过程的影响规律研究

Forrestal 等人^[12]应用空腔膨胀理论对弹体在隧道侵彻过程中进行受力分析,得到计算侵彻深度的经验公式为

$$P = \frac{m}{2\pi a^2 \rho N^*} \ln \left(1 + \frac{N \rho v_1^2}{S f'_c} \right) + 4a, \quad (12)$$

图 4 (网络版彩图)计算模型

图 5 (网络版彩图)数值模拟结果

(a) $t=41.90 \mu\text{s}$; (b) $t=128.63 \mu\text{s}$; (c) $t=234.21 \mu\text{s}$; (d) $t=379.23 \mu\text{s}$

式中, N^* 表示与弹丸 CRH 相关的头部形状系数. Jones 等人^[7]考虑了弹体头部系数 N^* 对侵彻效应的影响,将弹体侵彻过程中摩擦力表达为 $f=\mu p+\tau_0$, 根据计算

表 5 剩余速度和剩余质量

初始速度 (m/s)	剩余速度 (m/s)	初始质量 (g)	剩余质量 (g)	质量损失 幅度(%)
800	479.29	219.26	217.75	0.68
900	607.27	219.26	217.43	0.83
1000	713.74	219.26	217.31	0.89
1100	820.62	219.26	217.23	0.93
1200	880.33	219.26	217.18	0.95

结果将侵彻过程中弹靶间摩擦力简化 $f=\tau_0$, 进一步推导出弹体质量损失的经验公式:

$$\Delta M = \frac{\pi d^2 \tau_0 N^* Z}{4 \kappa Q}.$$

(13)

为了对弹丸头部系数对侵彻过程的影响开展数值

图 6 (网络版彩图)数值模拟结果(CRH=3.0)
(a) $t=0\ \mu\text{s}$; (b) $t=280.13\ \mu\text{s}$; (c) $t=520.71\ \mu\text{s}$; (d) $t=1131.32\ \mu\text{s}$

表 6 数值模拟结果与经验公式计算对比

头部系数 CRH	经验公式 侵深(cm)	数值模拟 侵深(cm)	经验公式 质量损失(%)	数值模拟 质量损失(%)
1.5	40.7	41.4	1.89	2.02
2.0	43.6	44.8	2.08	2.24
2.5	45.7	46.8	2.21	2.42
3.0	47.3	48.0	2.30	2.62
3.5	48.6	48.9	2.37	2.76
4.0	49.6	49.5	2.42	2.85

模拟研究, 建立了如下计算模型: 弹体长度 $L=80\ \text{mm}$, 弹体直径 $d=20\ \text{mm}$, 弹体及靶板材料分别为 4340 钢和 C60 混凝土, 弹体头部系数 $\text{CRH}=1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 和 4.0 , 靶板厚度为 $520\ \text{mm}$, 侵彻速度为 $900\ \text{m/s}$. CRH 为 3.0 的弹体侵彻混凝土靶过程如图 6 所示.

数值模拟结果与经验公式计算结果大致吻合, 侵彻深度随着 CRH 系数增大不断增加. 相同速度且弹体头部不发生较大变形情况下, CRH 系数越大, 弹体的侵彻能力越强. 但对于实际工程应用, 弹头 CRH 系数越大, 弹体头部越尖削, 结构强度减小, 并且更易发生跳弹现象, 故 CRH 值不宜过大. 从数值模拟结果和计算结果均可以看出, 相同质量和侵彻速度的弹丸, 侵彻过程中产生的质量损失随着头部系数的增大而增加, 在弹体形状设计时应当考虑头部系数变化引起的质量损失变化, 优化弹体结构. 数值模拟计算得到的弹丸质量损失稍大于经验公式计算得到的质量损失, 但基本吻合, 进一步说明程序对于弹体质量损失的计算较为合理.

4 结论

- 1) 提出了质点映射算法, 并在计算程序中嵌入了基于熔化热熔融理论的质量侵蚀模型, 以描述弹体高速侵彻过程中的质量侵蚀现象.
- 2) 对弹体高速侵彻混凝土靶板问题进行了数值模拟研究, 分析了侵彻速度及弹体 CRH 系数对侵彻性能及弹体质量侵蚀的影响, 验证了所研究算法对于描述弹体质量侵蚀问题的合理性.

参考文献

1 何翔, 徐翔云, 孙桂娟. 弹体高速侵彻混凝土效应的实验研究. 爆炸与冲击, 2010, 30: 1-6

2 杨建超, 何翔, 金栋梁. 弹体高速侵彻混凝土质量侵蚀特性实验研究. 防护工程, 2010, 32: 6-10

3 Forrestal M J, Piekutowski A J. Penetration experiments with 6061-T6511 aluminum targets and spherical-nose steel projectiles at striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s. Int J Impact Eng, 2000, 24: 57-67

- 4 何丽灵, 陈小伟, 范瑛. 先进钻地弹高速侵彻实验中质量磨蚀金相分析. 爆炸与冲击, 2012, 32: 515–522
- 5 武海军, 黄风雷, 王一楠, 等. 高速侵彻混凝土弹体头部侵蚀终点效应实验研究. 兵工学报, 2012, 33: 48–55
- 6 Silling S A, Forrestal M J. Mass loss from abrasion on ogive-nose steel projectiles that penetrate concrete targets. *Int J Impact Eng*, 2007, 34: 1814–1820
- 7 Jones S E, Foster J C, Toness O A, et al. An estimate for mass loss from high velocity steel penetrators. In: *Proceedings of the ASME PVP2435 Conference, Vancouver, 2002*. 227–237
- 8 Beissel S R, Johnson G R. A three-dimensional abrasion algorithm for projectile mass loss during penetration. *Int J Impact Eng*, 2002, 27: 771–789
- 9 Scheffler D R. Modeling non-eroding perforation of an oblique aluminum target using the Eulerian CTH hydrocode. *Int J Impact Eng*, 2005, 32: 461–472
- 10 Ma T B, Wang C, Ning J G. Multi-material Eulerian formulations and hydrocode for the simulation of explosions. *CMES Comp Model Eng*, 2008, 33: 155–178
- 11 Ren H L, Ma T B, Yao X H. Numerical studies of penetration problems by an improved particle method. *Sci China Phys Mech Astron*, 2012, 55: 2273–2283
- 12 Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *Int J Impact Eng*, 1994, 15: 395–405
- 13 Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. In: *Proceeding of the 14th International Symposium on Ballistics, Quebec, 1993*. 591–600
- 14 Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles. *Int J Impact Eng*, 1996, 18: 465–476

Numerical study on mass loss of high velocity penetration projectiles due to melting

MA TianBao¹ & WANG ZhiHua²

¹ State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Shanxi Key Lab. of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Based on the Eulerian hydrocode MMIC-2D for explosion and impact problems, both particle mapping method and mass loss model based on heat-melting theory are implanted. High velocity projectiles penetrating into concrete targets are numerically simulated with MMIC-2D. The simulation results are compared with related experimental data, and factors affecting the penetration effect and mass loss of the projectile such as penetration velocity and CRH value are studied.

numerical simulation, particle mapping method, concrete, penetration, mass loss

doi: 10.1360/N092016-00002