

模拟刚性动能弹丸侵彻混凝土的 FE-SPH 方法*

蔡清裕¹, 崔伟峰¹, 向东², 曾新吾¹

(1. 国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073 2. 总装工程兵科研一所, 江苏无锡 214035)

摘要:应用动力有限元与 SPH 相结合的方法对刚性动能弹丸高速侵彻混凝土靶进行了数值模拟分析, 使用 HJC 本构模型描述混凝土。计算结果与在 $\phi 57$ 气体炮上所获得的实验数据基本吻合,并能再现侵彻过程中弹的运动及混凝土的飞散、应力波的传播等物理现象。计算结果说明这种新的算法及 HJC 本构模型用来描述混凝土的侵彻问题是可行和有效的。

关键词:混凝土;侵彻;数据模拟

中图分类号:O385;E932.2 文献标识码:A

Simulation of Concrete Penetrated by Rigid Projectile with Coupled FE-SPH Methods

CAI Qing-yu¹, CUI Wei-feng¹, XIANG Dong², ZENG Xin-wu¹

(1. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The First Engineers Scientific Research Institute of the General Armament, Wuxi 214035, China)

Abstract: The combination of dynamic FEM and SPH method was applied to simulate the concrete target penetrated by high-velocity rigid projectile. The HJC constitutive model was applied to describe the behavior of concrete material. The numerical results are in good agreement with recent experimental results obtained from $\phi 57$ gas gun, and reproduce the details of the movement of projectile, the scattering of concrete, the propagation of stress wave in the target. The feasibility and validity of applying the newly obtained method and HJC concrete model to simulate such problems as the high-velocity impact and penetration in concrete have been also proved.

Key words: concrete; penetration; numerical simulation

有关反混凝土动能侵彻弹的研究成为近年来国内外一个新的研究热点。研究的核心问题为侵彻弹的优化设计与混凝土的动态破坏,实验、理论和数值模拟是三类有效的研究方法。因弹丸侵彻过程非常复杂,中外学者进行了大量理论和实验研究,但总结的经验公式^[1~5]显然是建立在各自实验的基础上,应用范围与条件不同,误差也较大。理论研究虽有一定的普遍性,基于相似律也能得到一些解析公式,但公式的形式表明最大侵深与各种参数的依赖关系各不相同,因此较可靠的大缩比规律是不存在的。数值模拟方法以其经济性与高效性成为此类研究最重要的手段,它能在定性或某种定量的程度上描述侵彻这一物理过程的细节,从而对战斗部或防护工程的设计提供指导作用。对于这类大变形、高压、高应变率的混凝土侵彻问题,合理的材料模型成为数值结果有效性的重要前提,而算法的选择更不容忽视。

1 实验研究

实验结果来自张若棋等^[5]在 $\phi 57$ 气体炮上所进行的小尺寸模型弹丸侵彻实验。锥头长杆实心弹丸直径 10mm,长径比为 14,半锥角为 22.5° ,总质量约 80g,使用 Cr12 模具钢制成,并经过热处理。混凝土靶体为浇灌在直径为 270mm,高为 300mm 软钢筒中的无配筋水泥砂浆靶,无围压静抗压强度为 44MPa。弹丸击靶前将模型弹与弹托分离,并测得弹丸的击靶速度。实验获取了弹丸在 3 种击靶速度下的侵深(见表 2)。图 1 展示了靶体受到撞击侵彻后所产生的破碎、层裂及径向裂纹。

* 收稿日期 2003 - 07 - 15
作者简介:蔡清裕(1974—),男,博士生。

2 计算方法

2.1 传统的拉氏算法、欧拉算法与 SPH 算法的优缺点

对混凝土侵彻进行模拟计算的传统方法是拉氏算法。该算法将单元网格附着在材料上,通过网格的变形显示材料界面。算法的优点是速度快,但在处理大变形时,网格很可能发生畸变,造成数值计算的困难,而网格重分将带来额外的输运计算,并使计算速度变慢。因此,计算结果在很大程度上依赖于材料常数、接触控制、失效控制等。

侵彻模拟也可以采用欧拉算法^[6]。该算法将单元网格固定在特定的空间,用物质输运和流动描述材料的大变形,避免了网格畸变,对高压下的冲击动力学研究有重要意义,但很难描述材料中诸如宏观裂纹之类的明显界面现象。

最早应用于天文学领域的 SPH 方法^[7]将材料离散成一系列负载有各力学量的粒子,不使用网格,计算时跟踪流动的粒子。该算法避免了拉氏方法中的网格畸变、失效及欧拉算法中的重分和输运计算,因此逐渐在流体动力学、爆炸^[9]、侵彻^[9]、超高速碰撞等领域得到推广应用。但目前 SPH 算法精度还不够高、界面处理很不成熟,对邻粒子的搜索还要占用相当多的计算资源。

2.2 拉氏算法与 SPH 算法的结合使用

混凝土受到弹丸侵彻时,大变形、破碎和层裂通常仅发生在撞击区,进行精确模拟有较大的难度。除此以外的大部分区域的材料响应均是弹性响应或小变形。

考虑到靶体材料的动态响应的空间分布特点,本文结合使用 SPH 算法与有限元算法,取长补短,在撞击区使用 SPH 算法,用流动的粒子描述混凝土的大变形、破碎及飞散,而在其他区域使用有限元拉氏算法,达到了使用有限的计算资源最大限度地获取物理过程细节的目的。计算中对混凝土使用相同的本构模型,并将边界处的 SPH 粒子固接在邻近的网格面上,粒子受到的作用力转移至拉氏网格面上的节点。当接触单元失效时,固接作用消失,粒子与网格之间使用普通接触算法。

3 计算模型及材料模型

3.1 计算模型及其边界条件

取实体模型的一半进行离散。将弹丸视为刚体并划分网格,而混凝土则分成两部分,中心部分半径为 12mm 的区域离散成光滑粒子,使用 SPH 算法,外围部分划分网格。模型网格划分及粒子排布如图 2 所示。在对称面上定义对称边界条件时,须约束网格节点的自由度,同时对处于对称界面附近的粒子使用“虚粒子”方法,即在对称边界的另一侧布置其镜像粒子(力学量标量相等,矢量对称),这样在对称边界处的粒子将不至于穿越对称面。弹丸与混凝土 SPH 粒子部分的接触采用基于罚函数的接触算法,相当于在接触界面设置一法向“弹簧”,如果侵彻节点穿透被侵彻表面,将受到弹簧反方向的作用力,以此实现接触作用。

3.2 材料模型及参数

混凝土材料模型的选取对计算结果也很重要。HJC 模型^[10]能很好地描述高应变率条件下混凝土的响应,其强度模型考虑了高压、应变率及损伤效应;由体积应变通过状态方程计算压力,并考虑了材料的压实,损伤累积计及了塑性体积应变、等效塑性应变及压力的影响。

HJC 模型的强度模型以规范化等效应力(真实应力和静态强度之比)描述:

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

$P^* = P/f'_c$, 为无量纲压力, f'_c 为混凝土的静态压缩强度; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, 为无量纲应变率。

材料损伤 $D(0 \leq D \leq 1)$ 与等效塑性应变和塑性体积应变相关,损伤积累表述为:

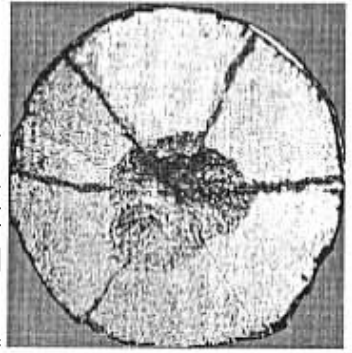


图 1 靶体侵彻状况
Fig. 1 The result of penetrated target

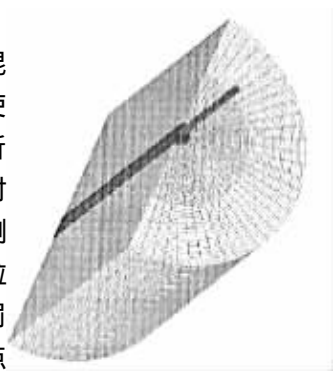


图 2 实体模型的离散化
Fig. 2 Scatter of the particles and the FE grids of the model

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f}$$

右端分子两项分别为在一次循环积分计算中等效塑性应变和塑性体积应变的增量,而

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

为在常压 P 下断裂时的塑性应变, T^* 为材料所能承受的规范化最大拉伸静水压, D_1 及 D_2 为损伤常数。

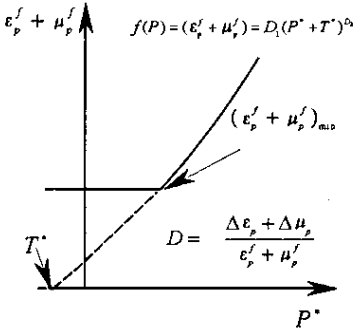


图3 混凝土损伤模型

Fig.3 Damage model of concrete

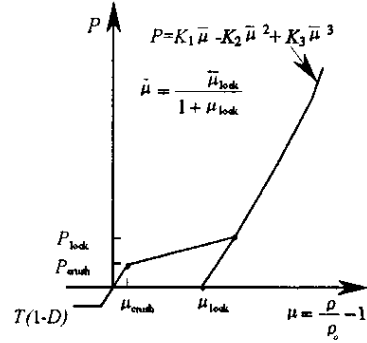


图4 混凝土压力—体积变形关系

Fig.4 The EOS of concrete

混凝土的状态方程三段表述,如图4所示。第一段为线弹性区($\mu \leq \mu_{crush}$),第二段为过渡段($\mu_{crush} \leq \mu \leq \mu_{lock}$),混凝土内部的空洞被逐渐排除,并产生塑性变形,卸载模量由两端的模量插值计算。第三段为无气孔密实区,满足凝聚态材料的 Hugoniot 关系。卸载模量为 K_1 。

表1给出了计算所采用的混凝土 HJC 本构模型的材料参数。

表1 混凝土 HJC 本构模型的材料参数

Tab.1 Concrete parameters of HJC model

ρ_0	f'_c	A	B	C	$SFMAX$	G	D_1	D_2
2.2g/cm ³	44MPa	0.75	1.65	0.007	11.7	16.4GPa	0.03	1.0
EFMIN	T	p_{crush}	μ_{crush}	p_{lock}	μ_{lock}	K_1	K_2	K_3
0.01	2.4MPa	13.6MPa	5.8×10^{-4}	1.05GPa	0.1	17.4GPa	38.8 GPa	29.8 GPa

4 计算结果及其分析

4.1 侵彻深度的分析

表2所示为计算终了时的侵彻深度值与实验值的比较,在侵彻深度上与实验结果比较接近,平均误差约为10%。产生误差的原因初步估计为混凝土的本构模型参数引起,对实验采用的混凝土除静压强度外其余各参数均未进行实验测量,可能对计算产生一定的误差。从表中可以看到,对于速度越高的弹丸侵深误差越小,说明所采用的计算方法及本构模型可能更适合于较高速的撞击和侵彻计算。

表2 弹丸侵彻深度的实验与计算结果比较

Tab.2 Comparison of penetration depth obtained from experiments and simulations

撞击速度(m/s)	298	322	374
实验值(mm)	101.0	116.0	131.0
计算值(mm)	89.5	103.6	119.0
相对误差(%)	11.4	10.7	9.2

图5是计算结果中提取得到的弹丸加速度历史曲线,从图中可以看出在撞击开始和弹丸停止阶段加速度变化比较剧烈。

4.2 混凝土部分的结果分析

为了检验 SPH 粒子与有限元网格耦合的有效性,通

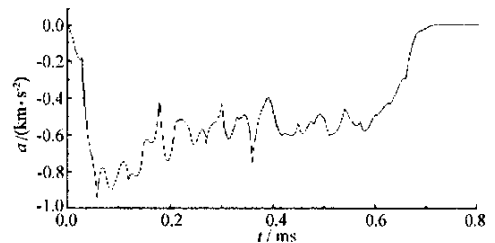


图5 弹丸的加速度历史

Fig.5 The history of projectile accelerater

过界面两侧物理量的连续性进行考察。在模型中部的耦合区附近提取一个粒子及与其相固接的一个单元,将计算所得的等效应力作一比较,如图6所示,由图中可见两曲线几乎重合,说明界面两侧的物理量是基本连续的,两者耦合较好,因此选择上述算法是合理和有效的。

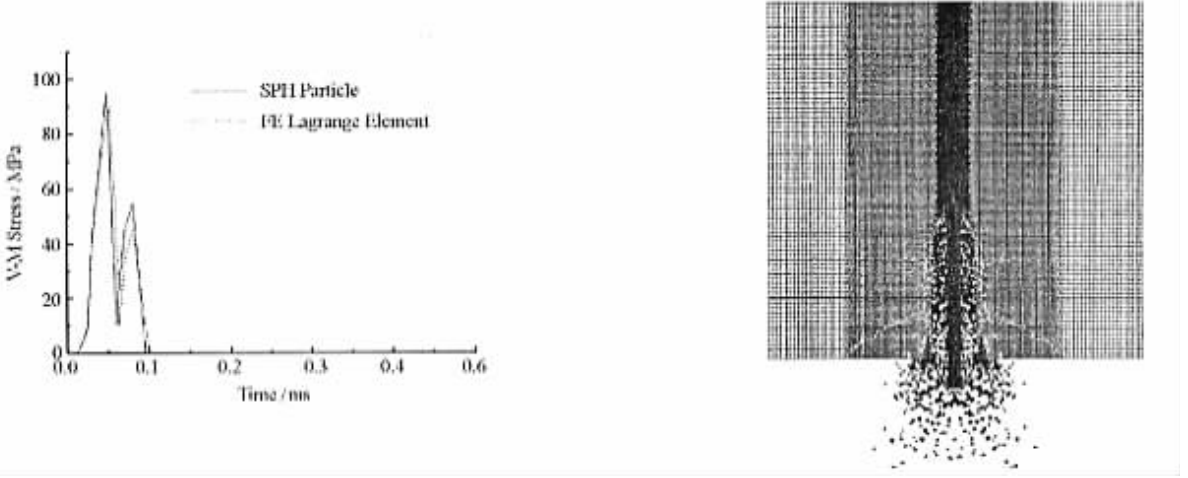


图7 混凝土侵彻模拟结果

Fig.7 The simulation result of concrete penetration

图7是弹丸以374m/s高速撞击、侵彻混凝土靶体后停止时(0.68ms)的图像。混凝土的中间部分为SPH粒子,从图中可以较清楚地看到混凝土在被撞击侵彻后引起的粒子飞散,以及在撞击接触处的局部区域产生的挤压破坏。在外围的有限元网格部分还可以看到撞击局部区域的破坏及大块崩落。所有的这些现象部分再现了实验中所观察到的现象,得到的结果界面清晰。

5 结论

混凝土在弹丸高速侵彻下的动态响应可以通过FEM与SPH相结合的算法来实现较准确和有效的模拟,既能清晰地显示材料界面,再现其他物理过程的部分细节,同时避免了纯拉氏算法为处理大变形而采用的各种人为“干涉”对计算结果的影响。HJC混凝土本构模型能较好地描述混凝土在高速撞击与侵彻下的大变形、高应变率及高压下所产生的压垮、破碎及断裂(或层裂)等响应行为。

参考文献:

- [1] 尹放林. 弹体侵彻深度计算公式对比研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 79 - 82.
- [2] Heuze F E. An Overview of Projectile Penetration into Geologic Materials, with Emphasis on Rocks [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1990, 27(2): 221 - 228.
- [3] Degen P P. Performance of Reinforced Concrete Slabs by Rigid Missiles [J]. J. Struct. Div., ASCE, 1980, 106(7): 1623 - 1642.
- [4] 刘瑞朝. 射弹侵彻混凝土深度经验公式评估与分析 [J]. 船舶力学, 2002 (supp.): 99 - 106.
- [5] 张若棋. 射弹弹形侵深系数的实验研究 [J]. 船舶力学, 2002 (supp.): 268 - 274.
- [6] 曹德青. 钢筋混凝土侵彻数值模拟研究 [D]. 北京理工大学论文, 2000.
- [7] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-spherical Stars [J]. Monthly Notices R. Astronomy Soc., 1977, 181: 375 - 389.
- [8] Monaghan J J. Shock Simulation by the Particle Method SPH [J]. J. Comput. Phys., 1983, 52: 374 - 389.
- [9] 宋顺成. 模拟导弹战斗部侵彻混凝土的数值计算 [C]. 第二届全国计算爆炸力学会议论文集: 计算爆炸力学理论、方法及工程应用, 2002: 277 - 283.
- [10] Holmquist T J. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures [C]. Proceedings of the 14th Inter. Symp. on Ballistics, 1993: 591 - 600.

