

冲击爆炸问题的三维物质点法数值仿真

张雄, 廉艳平, 杨鹏飞, 李金光, 张衍涛, 王汉奎, 刘岩

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要: 基于物质点法(Material Point Method, MPM)模拟超高速碰撞和爆炸问题时呈现的特点, 概述对MPM及其应用的扩展, 包括: 将MPM扩展应用于超高速碰撞问题, 物质点有限元法(Material Point Finite Element Method, MPFEM), 杂交MPFEM, MPM 质点自适应法, 基于局部多重背景网格的接触算法和并行MPM算法. 在此基础上开发针对冲击爆炸问题的三维显式并行MPM数值仿真软件MPM3D. MPM3D采用C++语言开发, 并基于Qt和VTK开发图形用户界面PeneBlast, 可在Windows, Linux和Mac OS等多种平台上运行. 关于超高速碰撞、侵彻、爆炸、边坡失效和金属切削等问题的大量实例表明MPM3D的可靠性和准确性. MPM3D可作为航天器空间碎片防护、常规武器研发与防护等的有效设计工具.

关键词: 物质点法; 无网格法; 超高速碰撞; 侵彻; 爆炸; MPM3D

中图分类号: O389; TB115.1 文献标志码: B

3D simulation based on material point method for impact and explosion problems

ZHANG Xiong, LIAN Yanping, YANG Pengfei, LI Jinguang,
ZHANG Yantao, WANG Hankui, LIU Yan

(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the characteristics of Material Point Method(MPM) in the simulation of hypervelocity impact and explosion problems, the extension on MPM and its application are introduced, including the application hypervelocity impact problems by using MPM, material point finite element method (MPFEM), hybrid MPFEM, an adaptive particle splitting scheme for MPM, contact algorithm based on local multiple background mesh, and parallel MPM algorithm. Based on the improvement, a 3D explicit parallel simulation software MPM3D is developed for impact and explosion problems. C++ is used to develop MPM3D and the graphical user interface PeneBlast is developed by Qt and VTK. MPM3D can run on different platforms such as Windows, Linux, Mac OS, and so on. Many examples about hypervelocity impact, penetration, explosion, slope failure and metal cutting verify the reliability and accuracy of MPM3D. MPM3D can be an effective design tool for spacecraft protection on space debris, conventional weapon development and protection, and so on.

收稿日期: 2011-02-23 修回日期: 2011-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(10872107); 国家重点基础研究发展计划("九七三"计划)(2010CB832701)

作者简介: 张雄(1966—), 男, 宁夏盐池人, 教授, 博导, 博士, 研究方向为计算力学, (E-mail) xzhang@tsinghua.edu.cn

Key words: material point method; mesh-free method; hypervelocity impact; penetration; explosion; MPM3D

0 引言

材料与结构在冲击爆炸载荷作用下的动态响应问题是几何、材料和边界条件均为非线性的多物理场强耦合问题,涉及高应变率、高压、高温、相变乃至化学反应,气体、液体和固体等多种物质间相互耦合甚至混合,材料不但会严重扭曲和破碎,还会熔化甚至气化.在这类问题的研究中,数值模拟比其他研究手段更经济,更便于观察,能突破试验和理论研究的局限性,正发挥越来越重要的作用.

数值模拟方法可分为拉格朗日法和欧拉法两大类.拉格朗日法中计算网格随物质一起变形,可方便地跟踪材料界面和引入与变形历史相关的材料模型,但对于涉及特大变形的问题会因网格严重畸变而产生数值求解困难,且难以有效模拟材料的破碎、熔化和汽化等行为;此类方法的代表性程序为 DYAN.欧拉法中计算网格固定在空间中,不存在网格畸变问题,但不易跟踪材料界面,且非线性对流项也导致数值求解困难.国内学者在此方面做了大量研究工作,宁建国等^[1]开发出欧拉型三维爆炸与冲击问题数值模拟软件 EXPLOSION-3D;北京计算数学与应用物理研究所开发出流体动力学程序 MEPH2Y 和 MEPH3D^[2-3];王景焘等^[4-5]基于高精度时空守恒元解算法开发出 SUPER CE/SE 程序.

近年来,无网格算法在国内引起广泛关注并被应用于冲击爆炸领域. LIU 等^[6]用光滑质点流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法对爆炸问题进行大量工作;杨秀敏^[7]用 SPH 方法并结合有限元法开发出爆炸冲击问题数值模拟软件 EF3D 和 EP3D;王宇新等^[8-9]用物质点法^[10] (Material Point Method, MPM) 模拟冲击爆炸等问题.

本文简要介绍 MPM 和本课题组针对超高速碰撞、侵彻和爆炸问题在 MPM 方面的研究,重点介绍所研发的三维显式并行 MPM 数值仿真软件 MPM3D 及其在超高速碰撞、侵彻和爆炸等方面的应用.

1 MPM

基于 FLIP (Fluid Implicit PIC) 方法^[11]发展起来的 MPM 采用拉格朗日法和欧拉法双重描述,将物体离散为一组在空间网格中运动的质点.这些质点携带所有物质信息,如质量、速度、应变和应力等,其运动表示物体的变形和运动.空间网格即背景网格

用于动量方程的求解和空间导数的计算,不携带任何物质信息.背景网格可在空间中固定,也可根据问题的特点按照某种方式自由布置.在每个时间步中,将物质点和背景网格完全固连,将物质点的物理量映射到背景网格节点上建立背景网格节点的运动方程,求解运动方程后再将背景网格节点的物理量映射回物质点,得到下一时刻物质点所携带的物质信息.这一步物质点和网格节点一同变形,没有相对运动,是拉格朗日求解,避免欧拉法中处理对流项的困难,且很容易跟踪物体的界面.物质点携带所有物质信息,故在下一个时间步中可以丢弃变形后的背景网格,仍采用规则的背景网格,从而避免拉格朗日法中因网格畸变而产生的数值困难.可见,MPM 结合拉格朗日法和欧拉法各自的优势,适于分析特大变形及流动问题.

MPM 采用线性形函数,其导数在格子 (cell) 之间不连续,因此当质点跨越格子时会对系统产生扰动,称为跨格子噪声 (cell-crossing noise),导致精度降低,甚至会使部分问题结果完全失真. BARDENHAGEN 等^[12]针对此问题发展广义插值 MPM (Generalized Interpolation MPM, GIMPM),有效抑制由于质点跨越格子而引起的数值噪声.

由于速度场的单值性,MPM 自动满足无滑移接触条件,便于处理碰撞接触问题,特别是在超高速碰撞问题的模拟中,弹靶间的滑移可以忽略,采用 MPM 无须采用特别的接触算法即可达到较好的模拟效果.为处理滑移接触, HU 等^[13]引入多重背景网格概念,各物体在接触节点处的法向运动量在公共背景网格上求解,而切向运动量则在各物体的背景网格上求解,既保证各物体在接触点处的法向速度和法向加速度连续,又允许它们的切向运动相互独立; BARDENHAGEN 等^[14]基于多重速度场的思想给出 MPM 的接触/摩擦/分离算法,用于颗粒材料的数值模拟; NAIRN^[15]将接触算法扩展到物体内部表面之间的自接触中,用于分析裂纹扩展问题.目前,MPM 已应用于冲击、爆炸、裂纹扩展、材料破坏 (脆性破坏、分层复合材料脱层破坏、层裂破坏)、多孔材料与颗粒材料和生物力学等的数值模拟中.

2 对 MPM 的扩展

2.1 超高速碰撞

在空间碎片防护设计中,研究碎片云对航天器

的作用非常重要. 通过侵蚀算法,有限元法可模拟弹丸对靶板的侵彻过程,但无法得到超高速碰撞所形成的碎片云形貌. 通过引入 Johnson-Cook 材料模型和 Mie-Gruneisen 状态方程,将 MPM 应用于弹丸超高速碰撞薄板问题,能较好地模拟薄板背后形成的碎片云形貌,展示 MPM 在该领域的应用前景.^[16]

2.2 物质点有限元法

MPM 虽然能避免拉格朗日法的网格畸变问题,但对于小变形问题,其效率和精度均低于有限元法,因此有必要将两种方法结合. 通过在大变形区域中引入背景网格,提出物质点有限元法(Material Point Finite Element Method, MPFEM).^[17] 物体初始用有限元离散,但在可能发生大变形的区域预先布置背景网格;将进入背景网格区域的有限元节点视为物质点,动量方程在背景网格上求解,而在其他区域,动量方程仍在有限元网格上求解. MPFEM 充分发挥 MPM 处理特大变形的能力和有限元法的高效性.

2.3 杂交 MPFEM

在将 MPM 扩展应用于钢筋混凝土的侵彻问题时,钢筋尺寸相对于混凝土尺寸较小,给离散带来困难. 为此,将有限元(如杆单元)引入到 MPM 中,提出杂交 MPFEM.^[18] 单元的节点与质点相同,将其动量方程在背景网格上积分,但其本构则在单元的高斯点上计算而不在质点上. 通过引入杆单元,可将 MPM 成功应用于钢筋混凝土侵彻的数值模拟中.

2.4 质点自适应分裂

在 MPM 中,当2个物质点间的距离大于背景网格的节点间距时,它们之间将没有相互作用而发生数值断裂. 针对该问题提出 MPM 的自适应分裂质点方案^[19],使质点可根据累计应变在变形最大的方向上自适应分裂,从而避免数值断裂,并将其成功应用于激波管和聚能射流等爆炸问题的数值模拟.

2.5 接触算法

对于中低速侵彻问题,标准 MPM 中的无滑移接触约束将产生较大的侵彻阻力,因此在分析侵彻问题时需引入接触条件.^[20] 建立基于局部多重背景网格的接触算法^[21],即仅在接触区域建立局部多重背景网格并引入多重速度场的思想,在背景网格上调整速度场并求解接触力. 同时,为避免 MPM 中提前接触的现象,给出计算即将接触的物体间物理距离的算法. 该方法减少对存储空间的需求并提高接触算法的效率,改善接触判断的精度.

2.6 并行 MPM

使用并行计算技术可实现更大规模问题的模拟. MPI 为分布式内存并行技术,适于在 Cluster 机器上运行. 基于 MPI 给出针对 Cluster 机器的 MPM 并行算法,该算法涉及局部背景网格分解,每个时间步均需要进行子区域重复节点之间的通信,而且还要建立复杂的并行 I/O. OpenMP 为共享内存并行技术,适于在多核计算机或者 SMP 机器上运行. 基于 OpenMP 提出针对共享内存计算机的 MPM 并行算法.^[22-23] OpenMP 支持增量并行,且不涉及复杂的区域分解,因此已逐步在显式有限元计算、分子动力学计算和流体力学计算并行化中得到应用.

3 MPM 数值仿真软件 MPM3D

在算法研究的基础上,采用 C++ 开发出冲击爆炸问题的三维显式并行 MPM 数值仿真软件 MPM3D,并为其开发 GUI 系统 PeneBlast,见图 1. 二者均采用跨平台的开发工具和程序库,可运行于 Windows, Linux 和 Mac OS 等多种平台上.

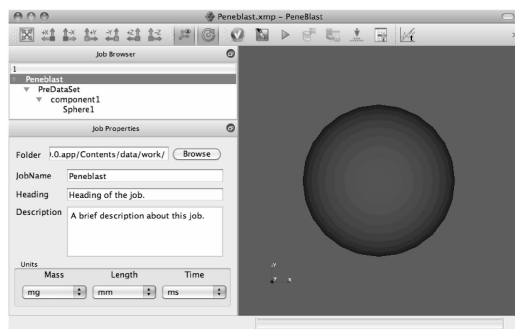


图1 MPM3D 的 GUI 系统 PeneBlast

Fig.1 GUI system PeneBlast of MPM3D

3.1 PeneBlast

PeneBlast 基于 Qt 和 VTK 开发. Qt 是跨平台的 C++ GUI 应用程序框架,跨平台特性优良、模块化程度高、可重用性好. VTK 是开源的跨平台可视化工具包,可用于处理三维计算机图形、图像和可视化.

PeneBlast 主要用于前处理和模型求解. 通过 PeneBlast,用户可完成从建立三维实体模型、物质点离散、从材料库中选择材料、施加边界条件、设置求解参数到生成供求解器读取的输入文件等一系列前处理过程. 其中,材料库中包含常用的材料参数,用户可直接在材料库中选择使用某种材料用于仿真,也可拷贝、修改或添加新的材料到材料库中.

生成输入文件后,可以在界面上调用求解器

MPM3D 对所建立的物质点模型进行求解,并实时监控整个求解过程;可以暂停、重新启动或中断求解器的运行.通过 PeneBlast 生成的供 MPM3D 读取的输入文件采用 XML 格式,易于扩充和读取.同时,PeneBlast 还可导入已有的输入文件并在此基础上继续建模,PeneBlast 也可对输入文件进行格式检查,并直接编辑输入文件.

后处理采用开源的多平台数据分析和可视化应用程序 ParaView,它可定性或定量分析数据并实现可视化.MPM3D 将计算结果保存为 h5 格式和 VTK PolyData 格式,供 ParaView 进行数据分析与可视化处理,绘制和导出变形动画、云图,绘制时间历程曲线以及提取某些点的变量值等.

3.2 MPM3D 求解器的主要功能

MPM3D 采用 C++ 编写,使程序具有更好的可维护性和良好的可扩充性,且易于添加新类以增加新的功能.目前,MPM3D 中具有多种材料模型,如弹性及弹塑性模型、Moony-Rivlin 超弹性模型、Johnson-Cook 模型、Drucker-Prager 岩土模型、HJC 混凝土模型、高能炸药模型、Gurson 模型以及可用于流体模拟的空材料模型等.冲击爆炸问题涉及高温、高压和高应变率,相对于低速下的材料响应,热力学效应更明显,故需用状态方程描述压强、密度和内能之间的关系.MPM3D 中包含用于高压固体模拟的 Gruneisen 状态方程、理想气体状态方程、多项式状态方程,用于爆轰产物模拟的 JWL 状态方程和用于模拟混凝土的 HJC 状态方程及 Palpha 状态方程.为处理材料断裂破坏问题,MPM3D 具有最大静水拉力失效、最大等效塑性应变失效、最大主应力/剪应力失效,最大主应变/剪应变失效以及 Johnson-Cook 损伤失效模型.为处理材料的随机特性导致其损伤破坏的随机性问题,MPM3D 支持随机失效设置,目前支持 Gauss 和 Weibull 2 种随机分布.

MPM3D 中爆炸采用基于 CJ 理论的理想爆轰,起爆方式为程序起爆.用户可定义多个起爆点,也可定义起爆面.为处理冲击波,添加人工体积黏性.

MPM3D 可对某物体设置初速度、常速度或者施加随时间变化的载荷及加速度场(如重力场等).

MPM3D 的背景网格可固定在空间不动,也可根据物体所占的区域动态变化.用户可设置是否使用 GIMP 算法和是否启用接触算法.时间积分为可变时间步长的显式积分,支持 USF,USL 或 MUSL 格式.^[15]用户既可采用 OpenMP 并行设置实现在共享内存计算机上的并行计算,又可采用 MPI 并行设置

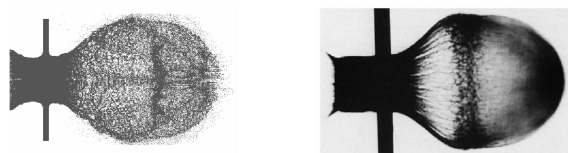
实现在计算机集群上的并行计算.

4 应用实例

4.1 超高速碰撞

4.1.1 弹丸超高速碰撞薄板——碎片云

一个半径为 7.5 mm,质量为 20 g 的铅弹以 6.56 km/s 的速度撞击厚度为 6.35 mm 的铅靶.30.6 μs 时碎片云的数值计算结果和试验结果见图 2.^[24]由 MPM3D 得到的 30.6 μs 时碎片云前端与靶板的距离和碎片云宽度分别为 198 mm 和 142 mm,其试验结果分别为 200 mm 和 145 mm.



(a) 数值计算结果 (b) 试验结果

图 2 铅弹撞击铅靶的结果比较

Fig. 2 Comparison of results for lead pellet impacting lead target

4.1.2 弹丸超高速碰撞厚板——成坑

一质量为 0.5 g 球形铜弹丸以 6.0 km/s 的速度撞击厚度为 40 mm,长和宽均为 80 mm 的铜靶.弹坑参数的数值计算结果与试验结果^[25]见表 1,可知二者吻合较好.32 μs 时碰撞变形结果切片见图 3.

表 1 弹坑参数结果比较

Tab. 1 Comparison of results for crater parameters

弹坑参数	弹坑深度/mm	弹坑直径/mm	坑深/坑径
试验	14	25.4	0.55
MPM3D	14	25.0	0.56

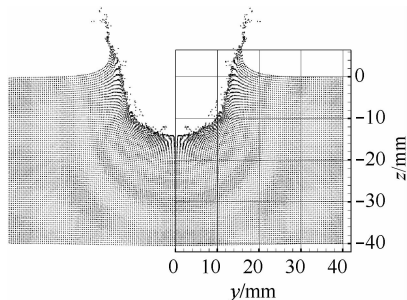


图 3 铜弹丸碰撞后的厚板形状

Fig. 3 Shape of thick plate impacted by copper projectile

4.2 侵彻问题

4.2.1 钢珠侵彻薄板

一个直径为 10 mm 的钢珠正侵彻一个厚度为

1 mm,直径为 178 mm 的薄圆板.靶体的最终变形数值计算结果与试验结果比较见图 4.^[26]试验所得靶体的变形高度与靶体的穿孔直径比值 h/D 为 0.84,MPM3D 计算得到的值为 0.85.

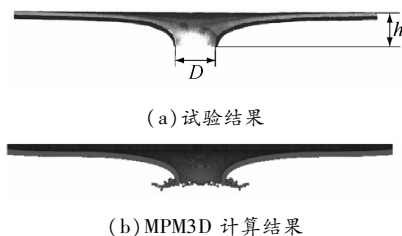


图 4 靶体最终变形结果比较

Fig. 4 Comparison of results for final deformation of target

4.2.2 金属靶斜侵彻

一长为 88.9 mm,直径为 12.9 mm 的尖拱钢弹以 575 m/s 的速度撞击倾角为 30°,厚度为 26.3 mm 的铝合金靶.194.4 μ s 时的数值计算结果和试验结果见图 5.^[27]由 MPM3D 得到的剩余弹速为 453.4 m/s,与试验值 455 m/s 吻合很好.

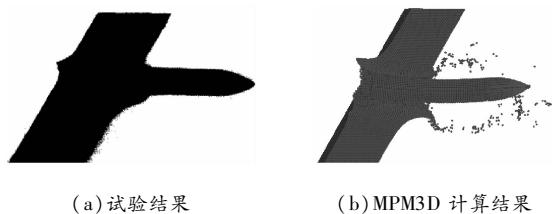


图 5 194.4 μ s 时尖拱弹侵彻铝靶变形结果比较

Fig. 5 Deformation comparison for ogive-nose projectile penetrating aluminum target at 194.4 μ s

4.2.3 钢筋混凝土靶正侵彻

一个长度为 144 mm,直径为 25.4 mm 的尖拱钢弹正侵彻厚度为 178 mm 的钢筋混凝土靶板.弹体以不同速度入射时,穿过靶体后剩余速度的数值计算结果与试验结果见图 6^[28];当弹体以初速度 749 m/s 打中钢筋时,钢筋混凝土的损伤结果见图 7.

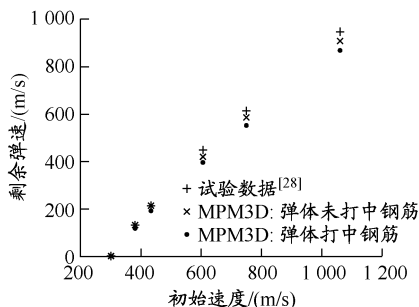
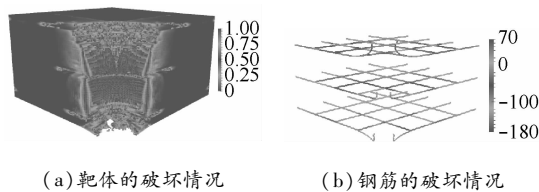


图 6 剩余弹速比较

Fig. 6 Comparison of residual velocity of projectile



(a)靶体的破坏情况 (b)钢筋的破坏情况

图 7 钢筋混凝土的损伤结果

Fig. 7 Damage of reinforced concrete

4.3 爆炸问题

4.3.1 激波管

激波管由薄膜分为 2 个初始静止的、具有不同密度和压力的区域(该算例中各参数和结果值采用无量纲描述),见图 8.在时间 $t > 0$ 时,薄膜破裂,激波和接触面会以不同的速度从左向右运动.通常观察 $t = 0.143$ 时刻的结果,此时激波前进大约 0.25.

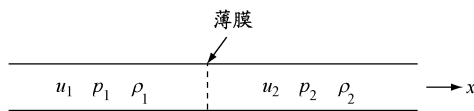


图 8 激波管示意图

Fig. 8 Schematic diagram of shock tube

MPM3D 采用 GIMP 算法给出的 $t = 0.143$ 时刻密度、速度、压力和比内能的分布曲线与解析解吻合很好,见图 9.

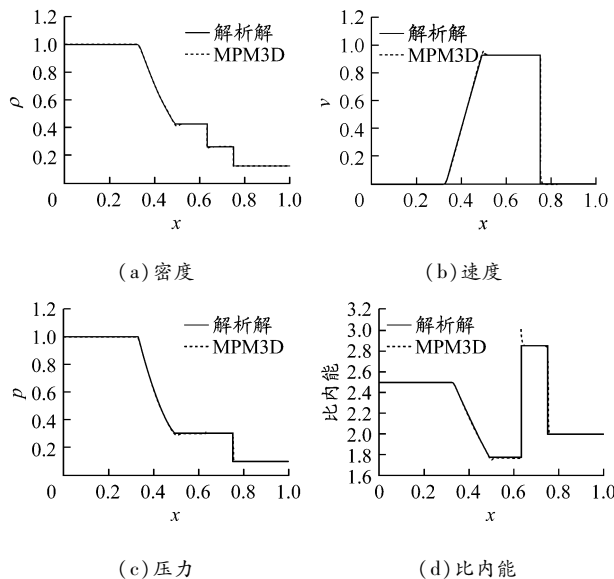


图 9 密度、速度、压力和比内能 MPM3D 结果与解析解的比较

Fig. 9 Comparison of density, velocity, pressure and energy obtained by MPM3D simulation and analytical solution

4.3.2 一维板条 TNT 爆轰

一维爆轰过程经常用于测试爆轰模拟的数值方法的基准检验,长为 0.1 m 的板条 TNT 炸药在一端

起爆,并在起爆端固定. $0 \sim 14 \mu\text{s}$ 时间内沿板条方向的压力曲线见图 10, 相邻曲线时间间隔为 $1 \mu\text{s}$. 数值模拟所得各曲线的峰值与解析解吻合较好.

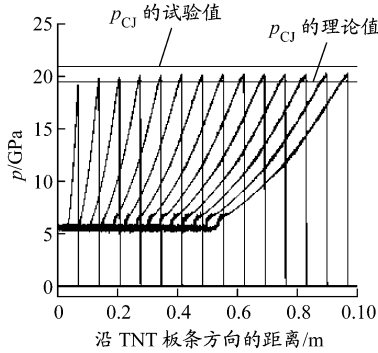


图 10 在起爆过程中沿板条方向的压力曲线

Fig. 10 Pressure curve along slab direction in detonation

4.3.3 爆轰驱动飞片

爆轰驱动飞片在多个领域应用广泛,该过程涉及爆轰波的传播、爆轰产物的急剧膨胀及其与周围材料相互作用产生的大变形. 非对称构型装药一维和二维模型的飞片终态速度与炸药爆轰速度比值随质量比变化的比较见图 11, 数值计算结果与 Gurney 公式及其修正的经验公式^[29-30] 预测值吻合很好.

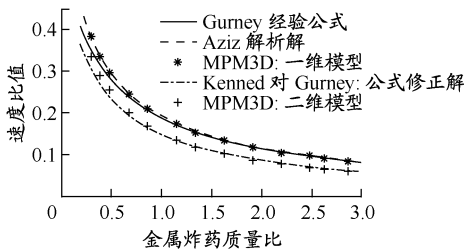


图 11 无量纲飞片终态速度

Fig. 11 Dimensional terminal velocity of flyer

4.3.4 爆炸碎片模拟

金属壳在爆炸作用下生成的碎片极具破坏性, 研究其机理对公共安全有重要意义. 采用 Gurson 模型及 Weibull 随机失效机制模拟材料断裂破碎过程的随机性. 采用 Gurson 模型的柱壳破碎过程见图 12, 三维球壳在爆炸作用下产生的裂纹和碎片形状见图 13.

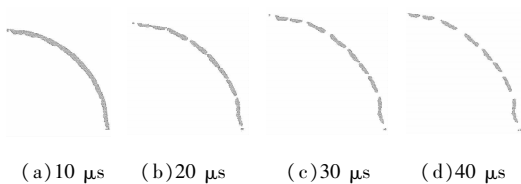


图 12 柱壳破碎过程

Fig. 12 Crushing process of cylindrical shell

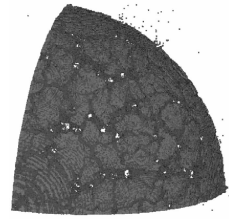


图 13 三维球壳在爆炸作用下产生的裂纹和碎片形状

Fig. 13 Shape of cracks and debris of 3D spherical shell under explosion effect

4.3.5 聚能射流模拟

聚能射流在穿甲、石油开采等领域有着重要的应用,为此进行聚能射流模拟. 聚能装药的初始构型见图 14, 半锥顶角为 38° , 炸药为 TNT, 外壳和药型罩材料为铜. 射流尖端的速度和杵的速度可由 BIRKHOFF 等提出的理论模型进行估计. 根据理论估计, 本例中射流尖端速度应为 3.7 km/s , 杵的速度应为 0.6 km/s .^[29] 模拟得到的 $21 \mu\text{s}$ 时 x 方向速度分布见图 15(a), 与理论估计基本吻合; 射流中温度的分布情况见图 15(b).

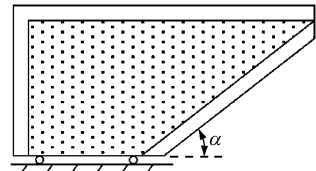


图 14 聚能装药的初始构型

Fig. 14 Initial configuration of shaped charge

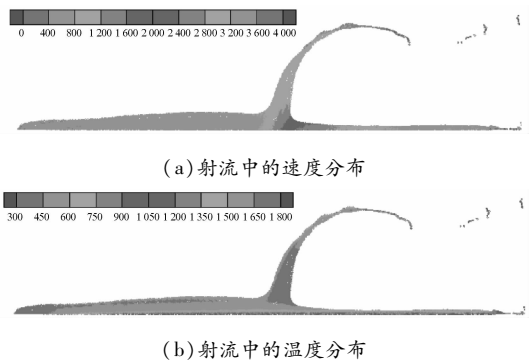


图 15 $21 \mu\text{s}$ 时射流中的速度分布和温度分布

Fig. 15 Distribution of velocity and temperature of jet at $21 \mu\text{s}$

4.4 其他问题

4.4.1 边坡失效问题

在岩土工程中,常采用铝棒堆积物的流动模拟沙和土的颗粒流动. 用 Drucker-Prager 模型对 BUI^[31] 进行的干燥铝棒堆积物的坍塌流动试验进行模拟. 数值计算与试验的比较见图 16(a) 和 16(b); 试验得到的失效区和计算结果的定量比较见图 16(c), 表明坡面及坡体失效区的数值计算结果与

试验结果吻合.

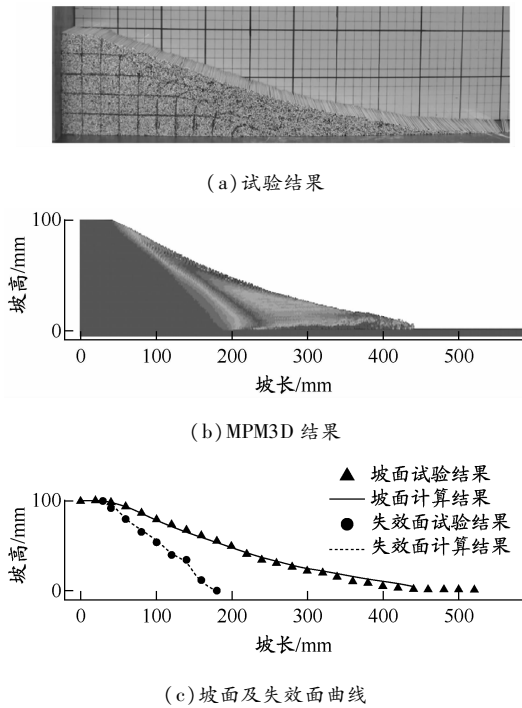


图 16 无黏沙土失效面结果比较

Fig. 16 Comparison of results of no-cohesive soil failure surface

4.4.2 金属切削问题

切削加工技术是工业装备过程中最重要和普遍的技术之一. 切削过程伴随着高速、高应变率、断裂和高温, 极易产生绝热剪切带进而产生锯齿状切屑. 模拟一个简单的切削过程, 见图 17. 在 0.01 ms 时第 1 条剪切带触发, 随着更多的剪切带触发, 锯齿状切屑形成.

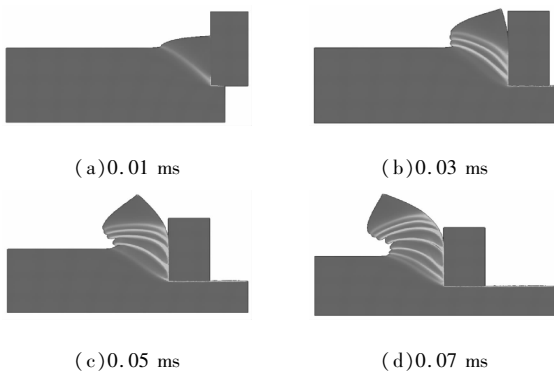


图 17 切削过程模拟

Fig. 17 Cutting process simulation

4.4.3 碳纳米管复合材料

碳纳米管有着突出的力学性能, 将其掺杂于基

体中可形成高性能的复合材料. 但碳纳米管细长比大, 在基体中均以弯曲形式存在, 给基于网格的建模带来极大的困难. 在 MPM3D 中, 利用塌落生成的碳管几何模型布点, 可构建出碳管的计算模型; 管间正交布点, 可构建出基体材料模型.

碳纳米管复合材料的计算模型见图 18, 基体材料点未画出, 碳管间黑点用于代表碳管间近距离的相互作用. 管间不同连接强度的力 - 位移曲线见图 19, 可得出碳管间相互作用对复合材料整体模量的影响.

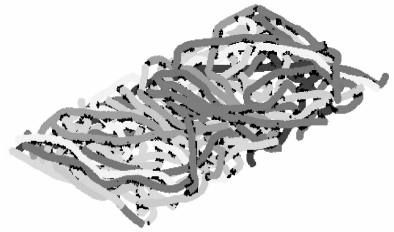


图 18 碳纳米管复合材料的计算模型

Fig. 18 Calculation model of carbon nanotubes composite

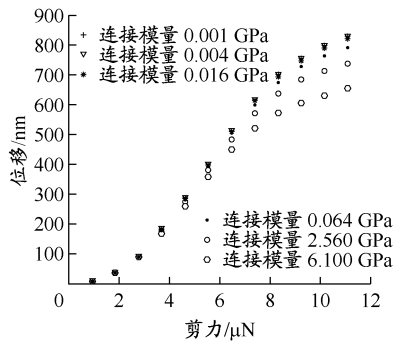


图 19 管间不同连接强度的力 - 位移曲线

Fig. 19 Force-displacement curves for different connection intensity between tubes

5 结 论

介绍冲击爆炸问题的显式三维 MPM 数值仿真软件 MPM3D 及其图形用户界面系统 PeneBlast, 可运行于 Windows, Linux 和 Mac OS 等多种平台上. 大量的超高速碰撞、侵彻爆炸数值算例说明该软件的可靠性和准确性. 该软件可用于超高速碰撞、侵彻和爆炸等问题的数值仿真, 为航天器空间碎片防护设计、常规武器研发与防护工程设计等领域提供有效的数字化设计工具.

致谢: 感谢马上博士、黄鹏博士及出站博士后马志涛对本课题所做的出色工作.

参考文献:

- [1] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 348.
- [2] 刘军, 何长江, 梁仙红. 三维弹塑性流体力学自适应欧拉方法研究[J]. 高压物理学报, 2008, 22(1): 155-178.
LIU Jun, HE Changjiang, LIANG Xianhong. An Eulerian adaptive mesh refinement method for three dimensional elastic-plastic hydrodynamic simulations[J]. J High Pressure Phys, 2008, 22(1): 155-178.
- [3] 何长江, 于志鲁, 冯其京. 高速碰撞的三维欧拉数值模拟方法[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 216-221.
HE Changjiang, YU Zhilu, FENG Qijing. 3D Eulerian numerical simulation method of high speed impact[J]. Explosion & Shock Waves, 1999, 19(3): 216-221.
- [4] 王景焘, 张德良, 刘凯欣. 基于CE/SE方法的二维Euler型多物质流体弹塑性问题计算[J]. 计算物理, 2007, 24(4): 395-401.
WANG Jingtao, ZHANG Deliang, LIU Kaixin. A Eulerian approach based on CE/SE method for 2D multimaterial elastic-plastic flows[J]. Chin J Comput Phys, 2007, 24(4): 395-401.
- [5] WANG Jingtao, LIU Kaixin, ZHANG Deliang. An improved CE/SE scheme for multi-material elastic-plastic flows and its applications[J]. Computers & Fluids, 2009, 38(3): 544-551.
- [6] LIU Guirong, LIU Moubin. 光滑粒子流体动力学——一种无网格粒子法[M]. 韩旭, 杨刚, 强洪夫, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005: 190-292.
- [7] 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟[M]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010: 308-309.
- [8] 王宇新, 陈震, 孙明. 滑移爆轰问题无网格MPM法模拟[J]. 力学与实践, 2006, 29(3): 20-25.
WANG Yuxin, CHEN Zhen, SUN Ming. Numerical simulation of slippage detonation by material point method-MPM[J]. Mech Eng, 2006, 29(3): 20-25.
- [9] 王宇新, 顾元宪, 孙明. 无网格MPM法在冲击载荷问题中的应用[J]. 工程力学, 2006, 23(5): 46-51.
WANG Yuxin, GU Yuanxian, SUN Ming. Application of material point method to shock load problems[J]. Eng Mech, 2006, 23(5): 46-51.
- [10] SULSKY D, CHEN Z, SCHREYER H L. A particle method for history-dependent materials[J]. Comput Methods Appl Mech & Eng, 1994, 118(1-2): 179-196.
- [11] BRACKBILL J U, KOTHE D B, RUPPEL H M. FLIP: a low-dissipation, particle-in-cell method for fluid flow[J]. Comput Phys Communications, 1988, 48(1): 25-38.
- [12] BARDENHAGEN S G, KOBER E M. The generalized interpolation material point method[J]. Comput Modeling Eng & Sci, 2004, 5(6): 477-496.
- [13] HU W, CHEN Z. A multi-mesh MPM for simulating the meshing process of spur gears[J]. Computers & Structures, 2003, 81(20): 1991-2002.
- [14] BARDENHAGEN S G, BRACKBILL J U, SULSKY D. The material point method for granular materials[J]. Comput Methods Appl Mech & Eng, 2000, 187(3-4): 529-541.
- [15] NAIRN J A. Material point method calculations with explicit cracks [J]. Comput Modeling Eng & Sci, 2003, 4(6): 649-663.
- [16] 马上, 张雄, 邱信明. 超高速碰撞问题的三维物质点法[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 273-278.
MA Shang, ZHANG Xiong, QIU Xinming. Three-dimensional material point method for hypervelocity impact[J]. Explosion & Shock Waves, 2006, 26(3): 273-278.
- [17] ZHANG Xiong, SZE K Y, MA Shang. An explicit material point finite element method for hypervelocity impact[J]. Int J Numer Methods Eng, 2006, 66(4): 689-706.
- [18] LIAN Yanping, ZHANG Xiong, ZHOU Xu, *et al.* A FEMP method and its application in modeling dynamic response of reinforced concrete subjected to impact loading[J]. Comput Methods Appl Mech & Eng, 2011, 200(17-20): 1659-1670.
- [19] MA Shang, ZHANG Xiong, LIAN Yanping, *et al.* Simulation of high explosive explosion using adaptive material point method[J]. Comput Modeling Eng & Sci, 2009, 39(2): 101-123.
- [20] HUANG Peng, ZHANG Xiong, MA Shang, *et al.* Contact algorithms for the material point method in impact and penetration simulation[J]. Int J Numer Methods Eng, 2011, 85(4): 498-517.
- [21] MA Z T, ZHANG Xiong, HUANG Peng. An object-oriented MPM framework for simulation of large deformation and contact of numerous grains[J]. Comput Modeling Eng & Sci, 2010, 55(1): 61-88.
- [22] HUANG Peng, ZHANG Xiong, MA Shang, *et al.* Shared memory OpenMP parallelization of explicit MPM and its application to hypervelocity impact[J]. Comput Modeling Eng & Sci, 2008, 38(2): 119-147.
- [23] ZHANG Yantao, ZHANG Xiong, LIU Yan. An alternated grid updating parallel algorithm for material point method using OpenMP[J]. CMES: Computer Modeling Eng & Sci, 2010, 69(2): 143-165.
- [24] Jr ANDERSON C E, TRUCANO T G, MULLIN S A. Debris cloud dynamics [J]. Int J Impact Eng, 1990, 9(1): 89-113.
- [25] WINGATE C A, STELLINGWERF R F, DAVIDSON R F, *et al.* Models of high velocity impact phenomena[J]. Int J Impact Eng, 1993, 14(1-4): 819-830.

- [26] SEO S W, MIN O K, LEE J H. Application of an improved contact algorithm for penetration analysis in SPH[J]. *Int J Impact Eng*, 2008, 35(6): 578-588.
- [27] PIEKUTOWSKI A J, FORRESTAL M J, POORMON K L, *et al.* Perforation of aluminium plates with ogive-nose steel rods at normal and oblique impacts[J]. *Int J Impact Eng*, 1996, 18(7-8): 877-887.
- [28] HANCHAK S J, FORRESTAL M J, YOUNG E R, *et al.* Perforation of concrete slabs with 48 MPa and 140 MPa unconfined compressive strengths[J]. *Int J Impact Eng*, 1992, 12(1): 1-7.
- [29] MAYERS M A. Dynamic behavior of materials [M]. 张庆明, 刘彦, 黄风雷, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2006: 165-170.
- [30] ZUKAS J A, WALTERS W P. Explosive effects and applications[M]. New York: Springer, 1998: 247-249.
- [31] BUI H H, FUKAGAWA R, SAKO K, *et al.* Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model[J]. *Int J Numer & Anal Methods Geomechanics*, 2008, 32(12): 1537-1570.

(编辑 于杰)