·基础研究·

空间碎片防护问题的物质点无网格法与软件系统

刘 岩[1],张 雄[1*],刘 平[1],廉艳平[1],马 上[2],官伟伟[3],王汉奎[4]
(1. 清华大学航天航空学院,北京 100084; 2. 北京宇航系统工程研究所,北京 100076;
3. 北京空间飞行器总体设计部,北京 100094; 4. 中国特种设备检测研究院,北京 100013)

摘要: 空间碎片超高速撞击的防护是航天器结构设计须重点考虑的问题,超高速撞击过程的极强非线性对传统数值方法提出了巨大挑战。作为新兴的无网格法的一种,物质点法易于处理超大变形、断裂破碎和高速碰撞中的大量接触过程,非常适合求解超高速碰撞问题。对物质点法的算法理论进行了多项改进,自主研发了三维物质点法软件系统 MPM3D,从多个角度模拟分析了空间碎片的超高速碰撞问题。模拟结果与实验吻合良好,能够正确再现开坑、层裂、碎片云等超高速碰撞典型现象,易于通过材料内禀结构建模研究泡沫、蜂窝等材料的撞击吸能和防护能力,显示出物质点法及其软件系统可以作为超高速碰撞的有力数值分析手段。

关键词: 空间碎片; 超高速碰撞; 无网格法; 物质点法; 仿真软件
中图分类号: O347.5; V415.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1674-5825(2015)05-0503-07
DOI:10.16329/j.cnki.zrht.2015.05.013

Meshfree Material Point Method and Software System for Problems of Shielding Space Debris

LIU Yan[1], ZHANG Xiong[1*], LIU Ping[1], LIAN Yanping[1], MA Shang[2],
GONG Weiwei[3], WANG Hankui[4]
(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076, China;
3. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;
4. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Shielding hyper-velocity impact (HVI) from space debris is of great concern in the design of spacecraft, while strong nonlinearities in HVI process pose great challenges to traditional numerical methods. As one kind of recently developed meshfree methods, material point method (MPM) can easily deal with extremely large deformation, fracture and fragmentation, and large number of contacts appearing in HVI process. Owing to the above advantages, MPM is very suitable for solving HVI problems. In recent years, the authors improved MPM theory in several aspects, developed three-dimensional MPM software system MPM3D, and numerically investigated HVI process of space debris in detail. Numerical results agree well with experimental results. Typical phenomena including excavation, spalling, and debris cloud can be reproduced correctly. The energy absorption and shielding capability of foam material and honeycomb material can be easily studied based on models of material internal structure. The above simulations demonstrate that MPM and MPM3D software are powerful numerical tools for HVI problems.

Key words: space debris; hyper-velocity impact; meshfree methods; material point method; simulation software

收稿日期: 2014-07-15; 修回日期: 2015-08-25
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB832701); 国家自然科学基金资助项目(10872107,11102097); 北京高等学校青年英才计划(YETP0111)
作者简介: 刘 岩(1978-),男,博士,副教授,研究方向为计算力学、冲击动力学。E-mail: yan-liu@tsinghua.edu.cn
通讯作者: 张 雄(1966-),男,博士,教授,研究方向为计算力学、冲击动力学、爆炸力学。E-mail: xzhang@tsinghua.edu.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引言

地球轨道上散布着大量的空间碎片和微流星体，如果它们与在轨运行的航天器相撞，相对撞击速度可达十几公里每秒，将对航天器造成很大的威胁。大型碎片的撞击可以直接撞毁航天器；中型碎片的撞击会造成航天器部件功能失效、执行任务失败；而小型碎片的撞击可以在航天器表面造成累积损伤，导致部件功能下降。

据美国NASA统计[1]，10 cm尺寸以上大型碎片的数量约为2.1万，这部分碎片只能依靠主动规避防范。1～10 cm尺寸碎片的数量约为50万，1 cm尺寸以下碎片的数量超过1亿，这两类碎片必须结合或完全采用被动防护以减少其对航天器的影响。

碎片的超高速撞击产生很高的温度和压力，使被撞击结构发生局部超大变形，材料进入塑性、发生断裂破碎乃至熔化气化。这样极强的非线性过程对传统数值方法提出了巨大挑战[2]，传统拉格朗日有限元法受网格畸变困扰，不易模拟超大变形问题；传统欧拉型方法虽然不存在网格畸变，但如何跟踪历史变量和物质界面仍然是亟待解决的问题。任意拉格朗日-欧拉(ALE)方法虽然在一定程度上克服了纯拉格朗日或纯欧拉方法遇到的困难，但三维复杂问题的ALE方法仍需深入研究。超高速碰撞过程中的成坑、层裂等现象用传统方法较难模拟，而撞击薄板所产生的碎片云等现象则几乎无法在拉格朗日有限元框架内描述。必须发展新型数值方法以更好的模拟超高速碰撞问题。

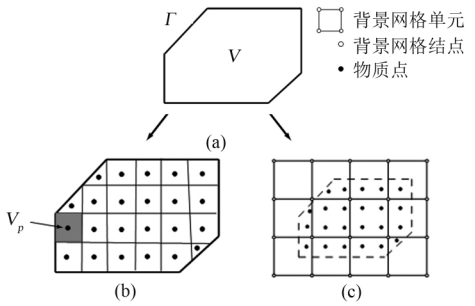
无网格法是20世纪90年代中期发展起来的一类新型数值方法[2-3]，其不存在网格畸变，可以很好地处理具有大变形和移动不连续面的问题。物质点无网格法(material point method，以下简称物质点法或MPM)[4-5]是无网格法的一种，其源于计算流体力学的质点网格法。MPM结合了拉格朗日描述和欧拉描述的优势，不但具有无网格法的通用优点，而且无需搜索临近质点、处理接触过程高效，因此可以高效准确地求解超高速碰撞问题。

自2005年以来，我们对MPM的理论进行了深入研究和改进，自主研发了三维物质点无网格法仿真软件系统MPM3D[6-7]，基于物质点法和MPM3D软件成功求解分析了超高速碰撞、爆炸、岩土力学、多尺度建模与计算、流固耦合等问题[4-5]。本文将介绍MPM的基本思想和MPM3D软件系统，总结空间碎片超高速碰撞问题的MPM研究成果，说明MPM及其软件系统在这方面的潜力。

2 物质点无网格法的原理和流程概述

MPM的原理和具体求解过程详见文献[4]的第3章，这里只对MPM的原理和流程进行必要的概述。

MPM的计算中使用一组质点和一套背景网格，如图1所示。质点以拉格朗日方式描述，其运动就代表了物质的运动，其上携带所有历史变量；背景网格固定在空间中(欧拉方式描述)，用以形成运动方程并求解，背景网格还起到计算导数的作用。



(a) 求解区域；(b) 拉格朗日质点；(c) 欧拉背景网格和拉格朗日质点。

图1 MPM离散示意图[4]

Fig. 1 Discretization in material point method[4]

在每个时间步中，质点与背景网格一起变形，通过变量映射过程在背景网格节点上建立式(1)所示动量方程并求解。

$$M_I\dot{\boldsymbol{v}}_I = \boldsymbol{f}_I^{\text{int}} + \boldsymbol{f}_I^{\text{ext}} \tag{1}$$

上式中I为背景网格节点编号，M_I和$\boldsymbol{v}_I$分别是节点质量和节点速度，$\boldsymbol{f}_I^{\text{int}}$和$\boldsymbol{f}_I^{\text{ext}}$是节点内力和节点外力，具体表达式见文献[4]的第3章。求解节点动量方程后，基于节点物理量更新质点的位置、速度、应变等物理量，并通过材料模型更新质点应力。

在每个时间步结束后，抛弃已变形的背景网格，在下一个时间步开始时重新使用未变形的背

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

景网格,从而保证了不会出现背景网格畸变问题。

MPM 的公式与拉格朗日有限元法非常类似,其主要区别表现在两个方面[4]: 一是 MPM 相当于采用了质点积分,而有限元法通常采用高斯积分; 二是 MPM 每步重置背景网格,相当于一种特殊的网格重构方法。需要指出,MPM 对于单纯小变形问题的求解精度和效率并不如同阶有限元法,但对于大变形问题,由于没有网格畸变和扭曲,MPM 的计算精度和效率都远高于有限元法。将有限元和 MPM 相结合,分别用于小变形阶段/小变形物体和大变形阶段/大变形物体,是发挥两种方法各自优势、提高精度和效率的有效方法[4,7]。

由于 MPM 中的质点并不参与近似,因此无需像光滑质点流体动力学方法(SPH) 等无网格法那样在每步搜索临近质点,计算效率大大提高。MPM 中临界时间步长取决于背景网格尺寸而非质点间距,因此不会由于发生了很大的压缩变形而迅速减小,这也大大提高了显式方法的计算效率。

超高速撞击中存在大量的接触,如空间碎片与被撞击体的接触、被撞击体内部结构的自接触等。MPM 可以利用背景网格构建效率很高的接触算法[8-9]。即使不采用任何特殊接触算法,MPM 同样可以保证不同物体间不发生相互穿透,这是因为 MPM 中质点速度由背景网格的物理量更新,可以自动保持单值速度场。

从以上论述可以看出,MPM 非常适合于空间碎片超高速碰撞问题的模拟,模拟中不会出现因网格畸变带来的困难,且具有很高的效率。

3　三维物质点无网格法仿真软件系统 MPM3D

3.1　核心求解器 MPM3D

MPM3D 软件[10]基于面向对象的思想,采用 C ++ 语言开发,非常易于添加新的功能模块。MPM3D 求解器中除 MPM 外,还集成了有限元求解器(含实体单元、杆单元、膜单元) 、有限差分求解器。最近所提出的耦合物质点有限元法、杂交物质点有限元法、自适应物质点有限元法、交替物质点有限差分法、耦合物质点有限差分法等新型算法的求解器也已集成到 MPM3D 软件中,这些新方法可以更好的发挥不同方法的优势。

材料模型对于模拟结果的物理真实性具有关键意义。MPM3D 软件中集成了多种常用的材料模型,包括强度模型、状态方程以及失效模型三类。与空间碎片超高速撞击相关的强度模型包括弹性和弹塑性模型、Johnson-Cook 模型、JH-2 脆性材料强度模型、Gurson 模型、Deshpande-Fleck 泡沫材料强度模型、描述流体材料的空材料强度模型等。上述强度模型对于航天器中常用的实体金属材料、蜂窝材料、泡沫材料、玻璃涂层材料等都可以进行很好的描述。

空间碎片撞击过程中的压力和温度很高,需要用状态方程描述压力的变化。MPM3D 软件中集成的状态方程包括 Mie-Grüneisen 状态方程、多项式状态方程、GRAY 三相状态方程、Tillotson 状态方程等高速撞击模拟中的常用方程。

失效模型确定质点是否失效,对于成坑、层裂、碎片云等现象的形成具有重要意义。MPM3D 软件中包括了等效塑性应变失效、静水拉伸失效、最大主应力/剪应力失效、最大主应变/剪应变失效等失效模型,另外在 Johnson-Cook、JH-2 等强度模型中的损伤量累积到临界后质点也将失效。

MPM3D 软件中提供了多种计算选项,可以针对问题特点提高计算效率和计算精度。如对于所模拟物体运动范围很大且只占用很少一部分背景网格时,可采用动态网格、移动网格或多重网格来提高计算效率。对于局部性很强的问题,可以采用多级网格和自适应网格,在计算量增加不大的前提下大幅提高计算精度。

空间碎片防护问题通常需要较大的离散规模。MPM3D 软件除串行版本以外,还具有 OpenMP 并行版本和 MPI 并行版本,可分别适用于多核单机和并行机。MPM3D 软件具有很好的跨平台特性,广泛适用于 Windows、Linux、Mac OS 系统。

在算法方面,MPM3D 软件还集成了多种接触算法、多种应力更新方式以及广义插值物质点法,基本包含了现有 MPM 研究的最新成果。

针对空间碎片防护具体结构,在 MPM3D 软件中还提供了通过输入参数生成六边形和四边

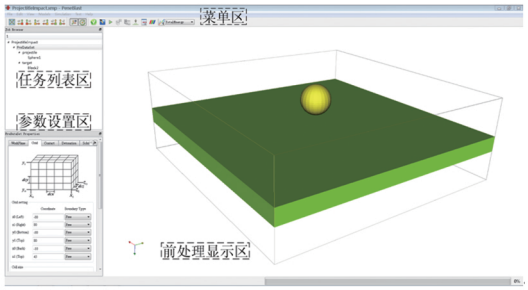
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

形蜂窝结构的功能，可以变化蜂窝结构的壁厚、孔径、高度等结构参数。

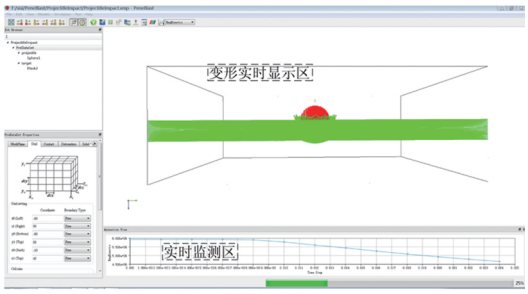
3.2 图形用户界面系统 MPM3D-GUI

MPM3D-GUI 是基于面向对象思想和 C ++ 语言开发的图形用户界面系统，采用了应用程序框架库 Qt 和可视化工具库 VTK，可适用于多种平台系统。

MPM3D-GUI 可完成几何建模、物质点离散、材料设定、边界条件施加、求解参数设置等一系列前处理过程，最后形成供核心求解器使用的输入文件。MPM3D-GUI 的任务参数设置界面如图 2(*a*) 所示。MPM3D-GUI 可直接调用求解器 MPM3D 进行计算，并实时监控求解过程。在求解中，还可以暂停、中断或重启动求解器。计算中的实时监控界面如图 2(*b*) 所示。



(a)任务参数设置
(a)Interface for setting job parameters



(b)实时监控
(b)Real-time monitor

图 2 MPM3D-GUI 界面
Fig. 2 MPM3D-GUI interfaces

MPM3D-GUI 的几何建模与离散包括了多种常用的几何构型; 也可以导入有限元网格，将其转化成物质点离散; 还可以导入实体模型，对其进行离散。由于质点之间无需建立连接关系，且通常采用规则背景网格，因此即使对于复杂形状物体也可以很方便地离散。在 MPM3D-GUI 中提供了一些常用材料的材料模型数据库，使用者也可以根据需要在该数据库中方便的添加新数据。

由于求解器的输入文件为 XML 格式，因此可以很方便的对生成的输入文件进行修改。修改时可以采用任意文本编辑器或 MPM3D-GUI 自带的编辑器。另外，MPM3D-GUI 中还自带了语法检查等工具，可检查输入文件的正确性。

MPM3D 软件计算完成后可输出 VTK 格式的结果文件，供开源软件 ParaView 进行数据分析和可视化处理，如绘制空间分布曲线、时程曲线、云图、动画等。

3.3 与现有商用软件的比较

目前很多商业软件，如 LS-Dyna、Pam-Crash、ABAQUS/Explicit 等，都集成了光滑质点流体动力学(SPH) 无网格法，具有一定的空间碎片撞击分析能力。但由于受到某些国外软件政策和 license 数量的限制，将上述软件用于空间碎片防护问题尚存在不便之处，很有必要发展具有自主知识产权的空间碎片防护专用仿真软件。

将 MPM 与上述软件中的 SPH 模块进行对比是很多研究人员感兴趣的工作。马上等[11] 在包括超高速碰撞模拟等多个方面对 MPM3D 和 LS-Dyna 的 SPH 模块进行了比较。由于受拉伸不稳定性的影响，SPH 方法在 Taylor 杆撞击问题中出现了明显的数值断裂，在超高速碰撞问题中所得碎片云形貌与实验结果有一定差别，出现了额外碎片集中区域; 而 MPM3D 对于上述问题的计算结果均与实验吻合良好，且效率远高于 SPH 模块。

4 空间碎片超高速撞击问题的数值模拟分析

本节介绍基于物质点法及 MPM3D 软件数值模拟典型空间碎片高速撞击问题的工作。空间碎片撞击飞行器舱壁的过程在很多情况下可以简化为对不同厚度均质板的撞击，本节首先介绍这方面的工作; 之后介绍近年来受到大量关注的轻质材料的空间碎片撞击问题研究; 最后介绍针对高速撞击问题发展的多尺度计算方法及其应用。

4.1 均质板的超高速撞击

4.1.1 薄板的超高速撞击

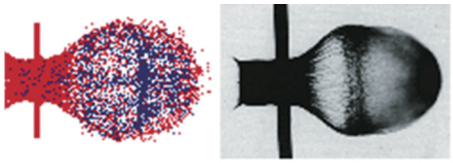
当被撞击靶板的厚度与碎片直径相近甚至比碎片直径小得多时，碎片的超高速撞击将使靶

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

板穿孔,并在靶板背面形成碎片云。传统有限元法多采用单元侵蚀方式以实现穿孔过程,即删除已失效的单元。单元侵蚀会带来质量损失,而且几乎无法描述碎片云的形成过程。

在 MPM 中,若质点的应力、应变状态满足失效准则,则该质点失效,不能承受除压力外的其它载荷,但该质点不被删除。失效质点的产生和增加就近似地描述了裂纹面的萌生和扩展,失效质点的承载特点保证了孔洞的形成。撞击后失效的碎片质点和靶体质点很好地描述了碎片云的形貌。

马上等[12]最先采用 MPM 对铜弹丸超高速撞击铜靶板进行了模拟,弹丸速度 6.6 km/s、弹丸直径-板厚比为 2.4。虽然模拟中只采用了约 3 万个质点,仍然获得了与实验较吻合的结果,初步展示出 MPM 的潜力。黄鹏等[13]基于 OpenMP 并行物质点法,对铅弹撞击铅靶进行了不同规模的计算,发现离散规模较小时碎片云的形状和尺寸与实验结果有一定的差别,而采用 1300 万质点的大规模计算能够给出与实验非常吻合的结果,如图 2 所示。Zhang 和 Jayaraman[14]采用多相流方程和双区域物质点法(DDMPM),进一步将空气对碎片云的作用考虑进来,对超高速碰撞问题进行了轴对称模拟,他们研究了背景网格尺寸和材料参数变化对碎片云形貌的影响。



(a) MPM模拟结果　(b)实验结果
(a) MPM numerical result　(b) Experimental result

图 3　铅弹撞击铅靶的碎片云构型比较[13]
Fig. 3　Comparison of debris cloud in the impact of lead projectile on lead target[13]

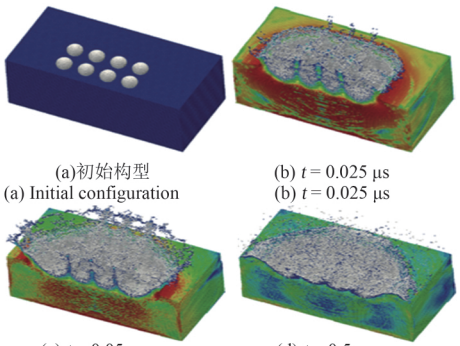
4.1.2　厚板的超高速撞击

若碎片尺寸与被撞击板尺寸相比很小,从靶板侧面和背面反射回来的应力波对撞击破坏过程的影响很小,则可以将靶板看成是半无限体,此时破坏形式主要是成坑。传统有限元法模拟成坑过程时通常需要删除失效的单元,不能正确反映出这些单元的后续影响,也无法有效地描述成坑中的物质飞溅过程。

类似对薄板撞击中穿孔过程的讨论,MPM 在模拟厚板撞击成坑过程中,不需要删除失效质点,可以更准确地描述失效物质对成坑过程的影响,且能很好地表现飞溅过程。

马上等[15]首先采用 MPM 对铜-铜超高速撞击成坑过程进行了模拟,弹丸为直径 5 mm、高 4 mm 的圆柱体,撞击速度 4 ~ 7 km/s。MPM 结果与实验结果吻合的很好,比文献中所报导的 SPH 方法的结果以及欧拉法程序 MESA、ALE 方法程序 CALE 的结果都要更接近实验结果。

已有的厚板超高速撞击研究主要集中于毫米级碎片,刘平等最近用 MPM 对微米级碎片和碎片群的撞击进行了数值模拟研究[16]。数值结果表明,从毫米级碎片撞击结果中总结出的半球律、能量-体积律等规律在单个微米级碎片撞击中同样适用,单碎片斜撞击的坑型在撞击速度为 4.5 km/s 时与正撞击的结果趋同。从不同质量流量、不同撞击角、不同撞击速度的结果中归纳出四种微米级碎片群正撞击坑型模式和七种斜撞击坑型模式。图 3 所示为微碎片群 4500 m/s 速度正撞击下的成坑过程及应力云图[16],图中撞击碎片用白色表示,靶体中的应力用彩色表示。



(a)初始构型　(b) t = 0.025 μs
(a) Initial configuration　(b) t = 0.025 μs
(c) t = 0.05 μs　(d) t = 0.5 μs
(c) t = 0.05 μs　(d) t = 0.5 μs

图 4　铝碎片群正撞击铝厚靶产生的撞击坑及应力云图[16]
Fig. 4　Craters and stress contours in normal impact of aluminum debris group on thick aluminum target[16]

4.2　轻质材料的超高速撞击

蜂窝材料、泡沫材料等轻质材料由于密度低、比强度高、比刚度高等优点受到广泛关注。在航天领域中,蜂窝夹芯结构已成为航天器的主要承载结构,泡沫材料也开始逐渐成为冲击防护结构的重要组成材料,因此对轻质材料在高速撞击下响应的研究是很有必要的。

轻质材料往往具有较为复杂的内部结构,这

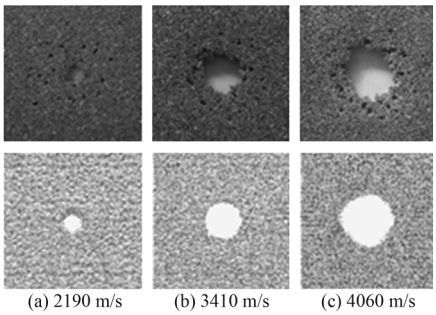
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

些内部结构对超高速撞击结果具有重要的影响。泡沫材料中的孔洞胞壁有分散碎片、吸收撞击能量的作用;蜂窝材料中的多边形孔道具有碎片汇聚作用,限制了撞击所产生碎片的飞散,可能产生更不利的防护结果。轻质防护材料的超高速撞击研究客观上需要构建其内部结构。

传统有限元法在构建材料内部结构时并不方便。闭孔泡沫材料内部随机分布、大小不一的孔洞往往只能用均一大小的正多面体近似代替。较为简单的蜂窝结构的有限元建模虽然不存在困难,但超高速碰撞中撞击碎片与蜂窝胞壁之间、不同蜂窝胞壁之间的大量接触过程仍然不易模拟。

MPM 在离散时只需要质点信息和规则背景网格信息,不需要质点之间的连接信息,大大减低了离散难度,非常适合建立材料复杂内结构的离散模型。宫伟伟等[17]将 CT 扫描片的像素点转化成物质点,重构了泡沫铝材料的内部细观结构,并基于细观模型计算了 Whipple 防护结构在速度为 2 ~ 4 km/s 的球形弹丸撞击下的防护效果。填充式 Whipple 防护结构中的泡沫铝层在各速度下的撞击破坏情况如图 4 所示,可见与实验吻合良好。计算结果表明撞击速度约为 2 km/s 时夹层式 Whipple 结构的防护性能更好,而撞击速度约为 4 km/s 时填充式 Whipple 结构的防护性能更好。

如前所述,物质点法能够高效便捷地处理大量接触过程。由于超高速撞击产生的压力很高,撞击过程中接触基本上可视为粘着接触[16],因此在 MPM 计算中可以不采用任何接触算法。刘平等[18]构建了蜂窝芯质的内结构质点模型,研究了蜂窝夹芯结构在不同质量、不同速度的毫米级碎片撞击下的破坏形貌和防护性能。研究表明后面板的撞击孔洞尺寸主要取决于撞击能量,而前面板的孔洞尺寸受碎片尺寸影响较大;蜂窝孔道对碎片的汇聚作用在撞击速度较低时更为明显。在模拟中还采用了局部加密以改善对撞击区域的细节描述,由于质点增删非常方便,很容易实现对任意区域的加密。



上行图形为实验结果,下行图形为 MPM 模拟结果。

图 5 填充式 Whipple 防护结构中的泡沫铝层在超高速撞击下的破坏情况[17]

Fig. 5 Damage of the aluminum foam layer in filling Whipple shielding structure under HVI[17]

4.3 分子动力学-物质点串行多尺度方法及其应用

超高速撞击产生的高温高压也对材料模型提出了挑战。现有超高速碰撞研究所常采用的状态方程,或者缺乏对相变、熔化、气化的描述能力,无法准确再现真实速度下空间碎片的撞击;或者过于复杂,由于实验中极端条件难以达到而不易确定其参数。

刘岩等[19]将分子动力学和 MPM 结合,建立了一种串行多尺度计算方法。计算中首先通过大量的分子动力学计算,获得大量状态点,再基于这些状态点构建数值状态方程或确定状态方程的参数。然后将确定的状态方程嵌入 MPM 计算,对宏观的超高速碰撞过程进行模拟。分子动力学-物质点多尺度方法通过微观分子模拟构建了能够描述极端状况的状态方程,很好地和宏观尺度的 MPM 相结合。

刘岩等[19]采用上述多尺度方法研究了铜-铝、铝-铜、铜-铜等超高速撞击过程,基于模拟结果给出了铜-铜高速撞击中的弹丸相变公式。计算表明,撞击速度在 3 km/s 以下时只有很少量的相变物质出现,而当撞击速度达到 6 km/s 以上时可出现热液物质。

5 结论

本文介绍了物质点无网格法的基本原理和三维物质点无网格法仿真软件系统 MPM3D,对已有的 MPM 求解分析空间碎片超高速碰撞的工作进行了总结。通过对空间碎片碰撞问题特点的分析,指出 MPM 和 MPM3D 软件系统在求解此类问题中有如下优势:

1) MPM 能够很好地描述传统方法难以刻画

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的成坑飞溅、碎片云等撞击现象,具有很高的计算效率;

2) MPM3D 软件具有高效的求解手段、丰富的材料模型、良好的扩充能力,有望成为一种可靠的自主研发空间碎片防护设计分析软件;

3) MPM 可以便捷地建立轻质材料的内部细观结构模型,准确描述材料内部结构与撞击碎片的相互作用。

参考文献(References)

[1] NASA orbital debris program office [EB/OL]. ortitaldebris. jsc. nasa. gov/index. html

[2] 张雄, 刘岩. 无网格法 [M]. 北京: 清华大学出版社 & Springer, 2004: 1-6.
Zhang X, Liu Y. Meshless methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press & Springer, 2004. 1-6. (in Chinese)

[3] 张雄, 刘岩, 马上. 无网格法的理论及应用 [J]. 力学进展, 2009, 39(1) : 1-36.
Zhang X, Liu Y, Ma S. Meshfree methods and their applications [J]. Advances in Mechanics, 2009. (in Chinese)

[4] 张雄, 廉艳平, 刘岩, 等. 物质点法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
Zhang X, Lian YP, Liu Y, et al. Material Point Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)

[5] 廉艳平, 张帆, 刘岩, 等. 物质点法的理论及应用 [J]. 力学进展, 2013, 43(2) : 237-264.
Lian YP, Zhang F, Liu Y, et al. Material point method and its applications [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(2) : 237-264. (in Chinese)

[6] 张雄, 马上. 冲击爆炸三维物质点法数值仿真软件 MPM3D: 中国, 计算机软件著作权登记号 2009SRBJ4761 [P]. 2009, 7.
Zhang X, Ma S. MPM3D: Three-dimensional Material Point Method Numerical Simulation Software for Impact and Explosion Problems. China, Computer Software Copyright Registration No. 2009SRBJ4761 [P]. 2009, 7. (in Chinese)

[7] 张雄, 廉艳平. 三维显式有限元物质点法仿真软件 FEMP3D: 中国, 计算机软件著作权登记号 2012SR032143 [P]. 2012. 4.
Zhang X, Lian YP. FEMP3D: Three-dimensional Explicit Finite Element Material Point Method Simulation Software. China, Computer Software Copyright Registration No. 2012SR032143 [P]. 2012. 4. (in Chinese)

[8] Huang P, Zhang X, Ma S, 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.

[9] Ma Z T, Zhang X, Huang P. An object-oriented MPM framework for simulation of large deformation and contact of numerous grains [J]. CMES: Comput. Model. Eng. Sci. , 2010, 55(1) : 61-88.

[10] 张雄. 冲击爆炸三维物质点法数值仿真软件 MPM3D [EB/OL]. www. mpm3d. com.
Zhang X. MPM3D: Three-dimensional Material Point Method Numerical Simulation Software for Impact and Explosion Problems [EB/OL]. www. mpm3d. com. (in Chinese)

[11] Ma S, Zhang X, Qiu X M. Comparison study of MPM and SPH in modeling hypervelocity impact problems [J]. Int. J. Impact Eng. , 2009, 36(2) : 272-282.

[12] 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 S, Zhang X, Qiu X M. Three dimensional material point method for hypervelocity impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26 (3) : 273-278. (in Chinese)

[13] Huang P, Zhang X, Ma S, et al. . Shared memory OpenMP parallelization of explicit MPM and its application to hypervelocity impact [J]. CMES: Comput. Model. Eng. Sci. , 2008, 38(2) : 119-148.

[14] Zhang D Z, Jayaraman B. Equations and closure models for material pulverization and debris flow [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2013, 56: 149-159.

[15] 马上. 超高速碰撞问题的三维物质点法模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2005.
Ma S. Material Point Meshfree Methods for Impact and Explosion Problems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)

[16] Liu P, Liu Y, Zhang X, et al. . Investigation on high-velocity impact of micron particles using material point method [J]. Int. J. Impact. Eng. , 2015, 75: 241-254. .

[17] Gong W W, Liu Y, Zhang X, et al. Numerical investigation on dynamical response of aluminum foam subject to hypervelocity impact with material point method [J]. CMES: Comput. Model. Eng. Sci. , 2012, 83(5) : 527-545.

[18] Liu P, Liu Y, Zhang X. Internal-structure-model based simulation research of shielding properties of honeycomb sandwich panel subjected to high-velocity impact [J]. Int. J. Impact. Eng. , 2015, 77: 120-133.

[19] Liu Y, Wang H K, Zhang X. A multiscale framework for high-velocity impact process with combined material point method and molecular dynamics [J]. Int. J. Mech. Mater. Design, 2013, 9(2) : 127-139.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net