空间碎片超高速碰撞数值模拟的 SPH 方法

闫晓军 张玉珠

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083) (北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

聂景旭

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 利用光滑质点动力学 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)方法对 Whipple 防护结构在空间碎片超高速碰撞下的物理过程进行了数值模拟. 在数值模拟中,为了充分发挥 SPH 方法和有限元方法 FEM(Finite Element Method)的优点,利用有限元单元和 SPH 节点混合建模,将有限元单元和 SPH 节点(SPH nodes)通过定义接触条件相结合,在大变形和飞溅区域采用 SPH 节点建模,而小变形区域则采用有限元单元建模,从而大大节省求解时间,提高计算效率. 计算结果表明,弹丸在穿透前板后,形成二次碎片,碎片云经膨胀和拉长,对后板造成轻微的损伤,这和文献的相关试验数据是符合的. 利用 SPH 方法对空间碎片的超高速碰撞过程进行数值模拟,不仅很好地预测了 Whipple 防护结构的破坏情况,而且对整个碰撞过程,包括碎片云的形成、膨胀和拉长过程都有形象的描述,符合超高速碰撞的试验测试结果.

关 键 词: 超高速碰撞; 数值模拟; 光滑质点动力学

中图分类号: V 415

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)03-0351-04

Numerical simulation of space debris hypervelocity impact using SPH method

Yan Xiaojun

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Zhang Yuzhu

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Nie Jingxu

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The SPH(smoothed particle hydrodynamics) was applied to simulate the problems in Whipple structure hypervelocity impact. In modeling the structure, the SPH and FEM(finite element method) discretizations were used simultaneously to reduce the CPU time, and this was very convenient and advantageous in practical engineering design when more CPU time consuming. SPH nodes were employed to model the area where the deformation was larger and likely to be perforated by the projectile. FEM nodes were employed to model the area with small deformation. The calculation results indicate that the fist bumper was perforated and the main wall cratered. Those results were compared with the test results from the literature and indicated fairly good agreement with each other. It demonstrates that SPH method is helpful and efficient in understanding the hypervelocity impact phenomena and fracture mechanism in the space debris hypervelocity impact problem.

Key words: hypervelocity impact; numerical simulation; SPH(smoothed particle hydrodynamics)

收稿日期: 2003-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50205002);航空科学基金资助项目(02C51031)

作者简介: 闫晓军(1973-),男,山西永济人,副教授, yanxiaojun@buaa.edu.cn.

1 SPH 方法

SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)方法的全称为光滑质点流体动力学方法,是 Lucy 于 1977 年提出的用于天体物理计算的一种无网格化 Lagrange 计算方法[1,2],其特点是在模拟物体大变形时,既可以克服 Euler 方法难于跟踪物质变形和不能识别材料界面位形的缺点,同时也解决了传统 Lagrange 方法在大变形下的网格扭曲(distortion)问题,因此在工程上有很大的应用潜力.

目前,SPH 方法的应用领域主要有:天体物理,燃气动力学,结构动力学(包括超高速碰撞)等等[1,2].

SPH 方法的核心是一种插值技术. 在 SPH 方法中,任一宏观变量(如密度、压力、温度、内能等)$A(r)$ 能方便地借助于一组无序点(disordered points)上的值表示成积分插值计算得到,其形式为

$$\langle A(r)\rangle = \int_{\Omega} A(r')W(r-r',h)\,\mathrm{d}r'$$

其中,Ω 为整个求解区域;W 为核函数;h 为光滑长度(smoothing length),用于定义一个质点对周围区域的影响程度.

SPH 方法的主要特点有:利用最接近相邻搜索算法(nearest neighbor search),可选择核函数 W,提供可变的光滑长度选择以及可以和有限元方法混合建模进行求解(如图 1 所示)等等. 由于算法差异,SPH 方法相对有限元 FE(Finite Element)方法其求解时间更长,因此对于一些特殊问题的数值模拟,建模时可以将有限元单元和 SPH 节点(SPH nodes)通过定义接触条件相结合,在大变形和飞溅区域采用 SPH 节点建模,而小变形区域则采用有限元单元建模,从而大大节省求解时间,提高计算效率. 有关 SPH 方法的详细理论介绍,可参考文献[1,2].

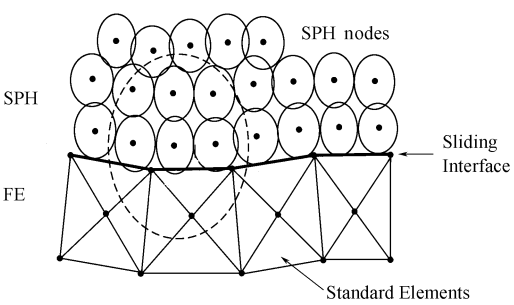

图 1 SPH 节点和有限元单元混合建模

2 超高速碰撞的数值模拟

2.1 防护结构

随着人类空间发射次数的日益增加,超高速飞行的空间碎片(相对平均速度在 10 km/s 左右[3])对航天器的碰撞问题已成为航天器设计中必须考虑的因素. 典型的 Whipple 防护结构是天体物理学家 Whipple 在 20 世纪 40 年代提出的一种双层板防护系统[3]. 该结构由前板、后板和两板间一定的间距组成. 由于前板能起到将高速碎片充分粉碎甚至可能融化或汽化的作用,破坏了碎片的完整性,形成不断膨胀的碎片云(debris cloud),使空间碎片对前板的点撞击载荷变为碎片云对后板的面冲击载荷,从而减轻了对于后板的破坏,对后板起到防护作用.

为了和文献[3]的试验数据相对比,此次数值模拟的 Whipple 防护结构如图 2 所示. 其中,空间碎片用圆柱形弹丸来模拟. 试验中,前后板在距离中心 R_B 处进行固定,其它结构特点及具体数值参见表 1.

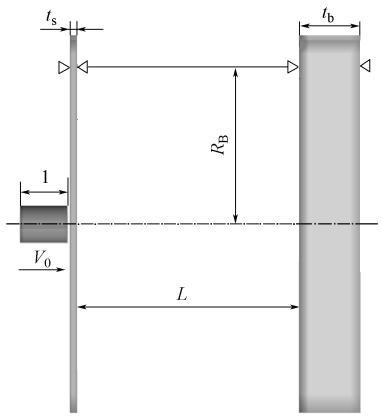

图 2 Whipple 结构尺寸示意图

表 1 Whipple 防护结构参数

结构	材料	几何形状	规格 长×宽(半径)/mm	规格 厚(长)度/mm	建模特点
弹丸/碎片	聚乙烯	圆柱型	$r=12.5$	$l=30$	SPH 节点
前板	Al-2024	板型	248×248	$t_s=4.8$	SPH 节点+有限元单元
后板	Al-2024	板型	248×248	$t_b=38.9$	SPH 节点+有限元单元
其它	固定半径 R_B/mm:105		碰撞速度 V_0/(km·s^{-1}):2.16		

对上述的 Whipple 防护结构进行离散化建模,考虑到弹丸以及前后板中间部位的变形较大,且空间碎片碰撞后飞溅的特点,在建模时前后板的中心部位采用 SPH 节点,其它部位则采用有限元单元(六面体 8 节点)进行建模,整个系统离散化后的计算模型如图 3 所示,防护板的放大后如

图 4 所示,弹丸的离散放大如图 5 所示. 采用混合建模的方法来离散整个系统,既可以充分利用 SPH 方法的优点,同时又可以大大节省计算时间.

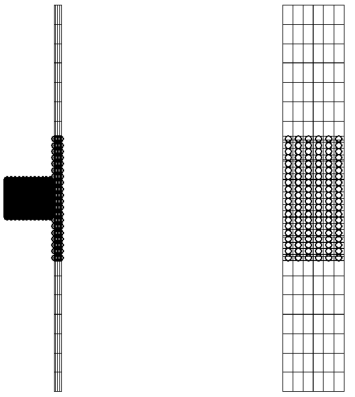

图 3　弹丸及防护板的离散模型

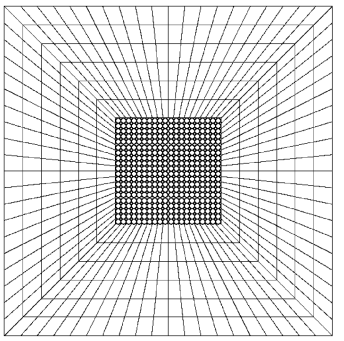

图 4　防护板的离散模型放大图

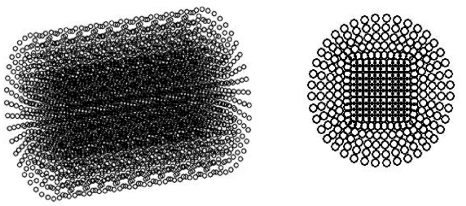

图 5　弹丸离散模型放大图

2.2　材料模型

超高速碰撞过程是一个极其复杂的过程,对其完善的描述应包括连续介质力学的各个方面,而且还要考虑到溅射、相变等问题,因此材料模型和参数的选取是超高速碰撞下非常重要的环节. 在材料模型和参数选取时,主要考虑以下 3 方面的内容:①材料强度模型,即大应变率下材料的应力应变关系;②物态方程,即高压下材料的流体压力和密度、内能等的关系;③材料的失效准则,对于有限元计算主要是考虑单元的失效标准. 由于 SPH 方法和有限元求解原理的差异,利用 SPH 方法求解时不需要定义材料的失效准则,材料是否失效,完全根据 SPH 节点的求解结果来确定. 因此,和有限元方法相比,SPH 方法减少了对试验数据的依赖性.

弹丸和前后板的材料参数可参见文献[3]. 计算时,弹丸的材料为聚乙烯(polyethylene),其材料参数均和文献[3]相同;前后板的材料均为 Al-2024,其材料模型如下:

强度模型选用 Johnson-Cook 模型:$Y=(A+B\varepsilon^{n})(1+C\cdot\ln\dot{\varepsilon})[1-(T^{*})^{m}]$. 其中,$A=2.65$ kbar;$B=4.26$ kbar;$n=0.34$;$C=0.015$;$m=1.0$;$T^{*}=\dfrac{T-T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}}-T_{\text{room}}}$,$T_{\text{melt}}=775$ K. 物态方程选用多项式形式来描述:$p=C_1+C_2\mu+C_3\alpha\mu^{2}+C_4\mu^{3}+(C_5+C_6\mu+C_7\mu^{2})E_i$. 其中,$p$ 为压力;$\mu=\rho/\rho_0-1$,ρ 为密度,ρ_0 为初始密度;如果 $\mu<0$,则 $\alpha=0$;E_i 为材料内能;$C_1\sim C_7$ 为材料常数.

在 SPH 方法求解中,选用的核函数 W 为三次样条函数,节点光滑长度 h 和半径的比值取为 2.1,通过定义接触对来实现有限元单元和 SPH 节点的结合.

3　计算结果

选用 PAM-SHOCK(ESI Group)提供的 SPH 求解器来进行此次超高速碰撞的求解. 求解后,空间碎片的整个碰撞过程如图 6 所示. 从图中可以看到,弹丸在穿透前板后,形成二次碎片,碎片云经膨胀和拉长,对后板造成轻微的损伤. 计算结果形象地描述了碎片云的形成和飞溅过程,符合有关超高速碰撞试验的图象记录[3,4].

针对同一个算例,将 SPH 方法的计算结果和

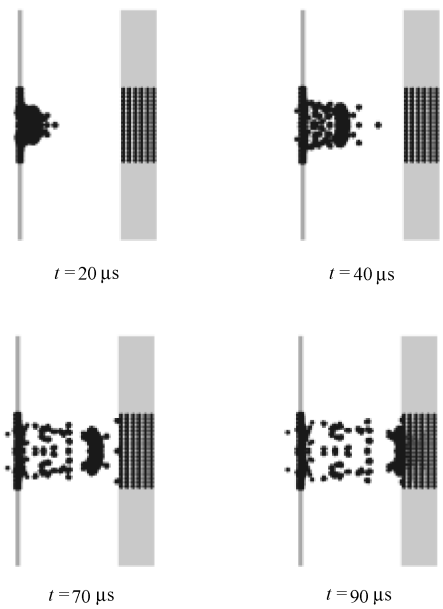

图 6　空间碎片碰撞过程的各个阶段

有限元方法相比较,有限元方法建模和求解相同算例的碰撞过程参见文献[5]. 对比 2 种方法的计算结果可以看到:在描述主碎片云(碎片云的主体部分)的形成和运动轨迹上,2 种方法的计算结果是基本一致的;SPH 方法的优点是更为形象地描述了二次碎片云的膨胀和拉长过程(见图 7. 为了清楚易见,且考虑到有限元单元建模部分位移很小,图中仅显示了 SPH 节点建模部分).

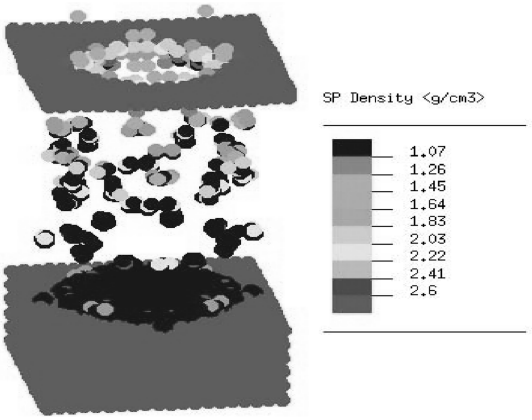

图 7 t=95 μs,碎片云撞击后板(仅显示 SPH 节点)

将 SPH 方法计算得到的前后板破坏情况和试验结果进行对比:后板有轻微破坏,与试验结果一致(图 8);前板破坏孔的直径为 42.4 mm,和试验结果(约 42 mm)几乎一致(图 9). 此外,从 SPH 的计算结果的云图中,还可以看到各节点碎片云的密度分布情况,从而判断碎片云所处的状态(固、液、气)(参见图 7 ~ 图 9).

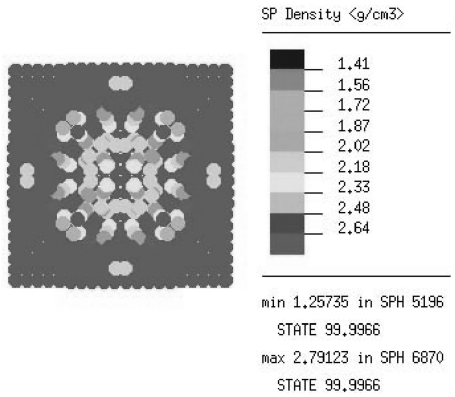

图 8 后板破坏情况(仅显示 SPH 节点)

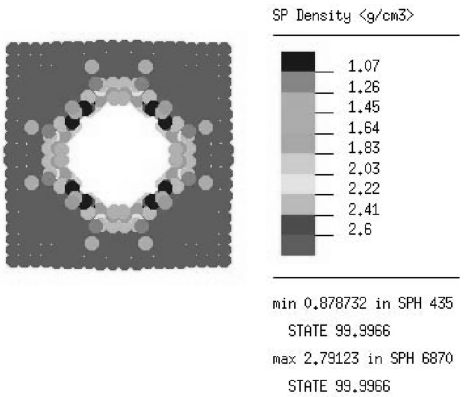

图 9 前板破坏情况

4 结束语

利用 SPH 方法对空间碎片的超高速碰撞过程进行数值模拟,不仅很好地预测了 Whipple 防护结构的破坏情况,而且对整个碰撞过程,包括碎片云的形成、膨胀和拉长过程都有形象的描述,符合超高速碰撞的试验测试结果;利用 SPH 方法无需确定材料的失效准则,减少了对试验数据的依赖性. 此外,鉴于 SPH 方法在求解时计算时间较长,在数学建模时,可以利用 SPH 节点和有限元单元混合建模,便于在工程设计中使用和推广.

参考文献 (**References**)

[1] Haug E, Groenenboom P, Kamoulakos A, *et al*. Application of SPH techniques in the PAM-SCL code family[A]. In: PUCA'97[C]. ESI Group, 1997

[2] Moreno Faraud, Roberto Destefanis, David Palmieri, *et al*. SPH simulation of debris impacts using two different computer codes [J]. Int J of Impact Engineering, 1999,23: 249 ~ 260

[3] Katayama M, Toda S, Kibe. Numerical simulation of space debris impacts on the Whipple shield [J]. Acta Astronautica, 1997, 40(12): 859 ~ 869

[4] 闫晓军. 超高速碰撞、复合冲蚀、盘/叶耦合振动的数值模拟与分析[R]. 北京:北京航空航天大学能源与动力工程学院博士后研究报告,2002
Yan Xiaojun. Numerical simulation about hypervelocity impact, synthetic erosion and blade-disk coupled vibration [R]. Beijing: School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002 (in Chinese)

[5] 闫晓军,张玉珠,聂景旭. 超高速碰撞下 Whipple 防护结构的数值模拟[J]. 宇航学报,2002,23(5):81 ~ 84
Yan Xiaojun, Zhang Yuzhu, Nie Jingxu. Numerical simulation of the Whipple shield under hypervelocity impact [J]. Journal of Astronautics, 2002,23(5): 81 ~ 84 (in Chinese)