

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0241

基于最优运输无网格法的 Whipple 屏超高速 撞击数值模拟*

樊江¹, 袁圆¹, 廖祐明¹, 袁庆浩¹, 陈高翔¹, 黎波²

(1. 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 凯斯西储大学机械与航空航天工程学院, 美国克利夫兰, OH44106)

摘要: Whipple 屏是航天器防护空间碎片撞击的常用结构。现有的方法在模拟 Whipple 屏超高速撞击时均存在问题, 本文采用最优运输无网格法 (optimal transportation meshfree, OTM) 对其进行模拟。OTM 法是一种拉格朗日无网格法, 其特点是运用最优运输理论对时间进行离散, 采用带有位置信息的节点和带有材料信息的物质点对空间进行离散, 利用局部最大熵 (local maximum entropy, LME) 方法得到插值函数, 基于能量释放率来判断材料是否失效。本文首先用 OTM 法对铝球超高速撞击单层铝板进行模拟, 通过与实验结果和各类 SPH 法的计算结果对比, 验证了 OTM 法在超高速撞击问题上的适用性; 然后采用 OTM 法对 Whipple 屏超高速撞击进行模拟, 将 OTM 法预测的缓冲墙与后墙的损伤情况与实验结果进行对比, 结果显示 OTM 法不仅能准确预测缓冲墙的弹孔直径, 也能很好地模拟出后墙的剥落、穿透情况和碎片云的形态。

关键词: 最优运输无网格法; 超高速撞击; Whipple 屏; 损伤

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Numerical simulation of Whipple shield hypervelocity impact based on optimal transportation meshfree method

FAN Jiang¹, YUAN Yuan¹, LIAO Huming¹, YUAN Qinghao¹, CHEN Gaoxiang¹, LI Bo²

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland OH44106, USA)

Abstract: The Whipple shield is often used for protecting spacecraft from the impact of space debris. There are a lot of defects in the general numerical simulation methods for hypervelocity impact problems, thus this paper used OTM (optimal transportation meshfree) method to simulate the impacting process. OTM is a Lagrangian meshless method which is characterized by applying optimal transportation theory to discretize time, using a set of nodal-points with position information and a set of material-points with material information to discretize space, utilizing LME (local maximum entropy) approximation schemes to get interpolation functions, and simulating the failure of materials by material-point failure method related to energy release rate. In this paper, OTM method was firstly used to simulate the impact of an aluminum ball on a single aluminum plate. The applicability of OTM method in hypervelocity impact was verified by comparing with the test results and the calculation results of other SPH methods. Then we used OTM method to simulate the hypervelocity impact of Whipple shield. The damage of the outer bumper and the spacecraft wall predicted by the OTM method was compared with the experimental results. It could be seen that the OTM method could not only predict the diameter of the bullet hole of the outer bumper, but also accurately simulate the spalling and penetration of the spacecraft wall, and the shape of the debris cloud.

Keywords: optimal transportation meshfree; hypervelocity impact; whipple shield; damage

* 收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-02-18

第一作者: 樊江 (1973—), 男, 博士, 副教授, fanjiang@buaa.edu.cn

通信作者: 黎波 (1979—), 男, 博士, 教授, bo.li14@case.edu

太空中微流星体和空间碎片虽然体形很小,但由于通常都具有超高的相对速度(2~15 km/s),会对航天器的安全造成巨大的威胁。例如,长时间暴露的航天器外部超过 30 000 个直径大于 0.3 mm 的陨石坑都是由微流星体或轨道碎片撞击形成^[1]。航天防护中常采用 Whipple 屏对特征尺寸 1 cm 以下的碎片进行破碎^[2-3]。Whipple 屏在超高速撞击后的损伤状态对于 Whipple 屏的优化设计至关重要。

超高速撞击的物理过程非常复杂。撞击过程中,材料的惯性、可压缩性效应或相变效应比结构效应更显著,伴随着大变形、热流固耦合、相变(液化、气化、凝固等)、碎裂等现象,采用数值方法进行准确模拟是一项巨大的挑战^[4]。基于网格的超高速撞击模拟存在着网格畸变或者需要不断重新划分网格^[5]的缺点;而无网格法由于不需要进行网格离散及采用高阶插值函数,有利于解决大变形和流固耦合问题,在超高速撞击问题上应用更为广泛。目前常用的无网格方法有光滑粒子流体动力学法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)和再生核粒子法(reproducing kernel particle method, RKPM)以及质量点法(material point method, MPM)等。有大量的研究应用以上的方法^[6-7]及其改进方法^[8]对 Whipple 屏的超高速撞击进行模拟,虽然取得了丰富研究成果,但由于算法本身的固有缺陷,仍然无法解决准确设置位移边界条件^[9]、计算效率不高^[10]、拉应力不稳定^[11]及有效计算带摩擦的动态接触等问题,同时也缺乏严密的收敛性与误差理论分析。

最优运输无网格方法(optimal transportation meshfree, OTM)是由 Li 等^[12]提出的一种基于最优运输理论和局部最大熵插值函数的无网格方法,该方法结合基于能量释放率的物质点失效方式,能够很好地解决现有 Whipple 屏超高速撞击模拟方法存在的问题。

本文首先采用 OTM 法模拟铝球超高速撞击单层铝板,通过与实验结果以及其他数值方法的计算结果的比较,验证 OTM 法在超高速撞击问题上的适用性;然后采用 OTM 法对 Whipple 屏超高速撞击问题进行模拟,研究不同速度不同撞击角度下的碎片云形状、缓冲墙弹孔尺寸以及后墙剥落穿透的损伤情况,并与文献^[13]的实验结果进行对比。

1 OTM 理论

OTM 法的主要特点是采用局部最大熵无网格插值函数,克服了一般无网格法中插值函数不满足 Kronecker delta 属性的本质缺陷,解决了传统无网格法难以准确施加位移边界条件的问题;采用物质点充当积分点,有效避免了计算结果在拉伸载荷下的不稳定性;采用最优运输理论对时间离散,保证了哈密顿作用量的时间离散形式满足动量守恒条件,且收敛性能得到严格的数学证明^[14];采用基于能量释放率的物质点失效方式,能够很好地模拟材料的损伤情况,并且该方式已被证明可收敛到 Griffith 断裂准则^[15]。

1.1 时间离散

与时间相关的问题可以转化为一系列以最小化原理为特征的递增问题。OTM 法采用最优运输理论离散流体或固体粒子流动的动能。最优运输理论通过最小化某一时间间隔 $[t_k, t_{k+1}]$ 内物体运动的哈密顿作用量 $S[\rho, v]$ 来得到 $[\rho, v]$ (ρ 和 v 分别为物体的密度和速度),描述了质量运输问题的真实运动过程。时间间隔 $[t_k, t_{k+1}]$ 中初始质量密度 ρ_k 和最终质量密度 ρ_{k+1} 之间的 Wasserstein 距离给出了动能增量的确切最小值。Wasserstein 距离 d_w 的定义为:

$$d_w^2(\rho_k, \rho_{k+1}) = \inf_T \int_{\Omega_k} |T(x) - x|^2 \rho_k(x) dV \quad (1)$$

式中: T 是对于 ρ_k 到 ρ_{k+1} 任何可能的映射。

设 $t_0 = a < t_1 < t_2 < \dots < t_k < t_{k+1} < \dots < t_{n-1} < t_n = b$ 是时间间隔 $[a, b]$ 的离散化,并假设在时间 t_k 时, ρ_k 、 φ_k 是已知的,在时间 t_{k+1} 处的状态 φ_{k+1} 可以通过求极限的方式近似得到。差分 $(\varphi_{k+1} - \varphi_k) / \Delta t$ 的极限即 $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ 趋于零时可以表示速率。因此采用 Wasserstein 距离表示的时间离散后的动能项为:

$$K = \frac{1}{2} \frac{d_w^2(\rho_k, \rho_{k+1})}{(t_{k+1} - t_k)^2} \quad (2)$$

由此可得到时间离散后的哈密顿作用量形式

$$S(\varphi_1, \dots, \varphi_{N-1}) = \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{2} \frac{d_w^2(\rho_k, \rho_{k+1})}{(t_{k+1} - t_k)^2} - \frac{1}{2} [U(\varphi_k) + U(\varphi_{k+1})] \right\} \times (t_{k+1} - t_k) \quad (3)$$

式中: $U(\varphi)$ 为自由能, 代表与体积力、运动约束或边界压力相关的能量, 其表达式为:

$$U(\varphi) = \int_B f(\nabla\varphi) dx \quad (4)$$

式中: B 为积分区域, $f(\nabla\varphi)$ 是单位体积上的增量自由能密度, $\varphi_{k \rightarrow k+1}$ 为增量传输映射, 详见 1.2 节。

最优运输理论为 OTM 法中显式的时间积分算法提供了可靠的理论基础, 如果将时间视为一个独立的广义坐标并且采用连续的时间步长, 总能量也能精确守恒^[16]。

1.2 空间离散

OTM 法将计算域分为两类点的集合。一类为节点, 用下标 a 表示, 包含了位置、速度、加速度的信息; 一类为物质点, 用下标 p 表示, 包含了材料参数、质量、应力应变等信息, 相当于一般有限元法中的积分点。定义在 t_k 时刻节点的坐标为 $x_{a,k}$, 物质点的坐标为 $x_{p,k}$, 如图 1 所示。

从 t_k 时刻到 t_{k+1} 时刻的位置迁移由变形映射函数 $\varphi_{k \rightarrow k+1}(x)$ 表示

$$\varphi_{k \rightarrow k+1}(x) = \sum_{a=1}^M x_{a,k+1} N_{a,k}(x) \quad (5)$$

式中: M 是 $x_{p,k+1}$ 邻域 $N_h(x_{p,k})$ 范围内节点的个数; 插值函数 $N_{a,k}(x)$ 为局部最大熵形函数, 它是考虑了局部熵最大(也就是最随机的状态)、同时又考虑了邻域最小的优化问题的解^[14], 其表达式为

$$N_a(x) = \frac{1}{Z(x, \lambda^*(x))} \exp[-\beta|x - x_a|^2 + \lambda^*(x) \cdot (x - x_a)] \quad (6)$$

其中

$$\lambda^*(x) = \arg \min \lg Z(x, \lambda), \lambda \in \mathbf{R}^n \quad (7)$$

$$Z(x, \lambda) = \sum_{a=1}^M \exp[-\beta|x - x_a|^2 + \lambda \cdot (x - x_a)] \quad (8)$$

式中: β 是 Pareto 最优参数; 与局部熵有关; $\lambda^*(x)$ 是最优拉格朗日乘子; 插值函数 $N_{a,k}(x)$ 的约束条件为

$$N_a(x) \geq 0, a \in [1, M] \quad (9)$$

$$\sum N_a(x) = 1 \quad (10)$$

$$\sum N_a(x) x_a = x \quad (11)$$

约束条件确保了所得到的形函数满足零阶和一阶连续性。

空间离散后可得到完全离散的作用量形式

$$S_h(\varphi_{h,1}, \dots, \varphi_{h,n-1}) = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{p=1}^M \left\{ \frac{m_p}{2} \frac{|x_{p,k+1} - x_{p,k}|^2}{(t_{k+1} - t_k)^2} - \frac{1}{2} [m_p f(\nabla\varphi_{h,k}(x_{p,k})) + m_p f(\nabla\varphi_{h,k+1}(x_{p,k+1}))] \right\} \times (t_{k+1} - t_k) \quad (12)$$

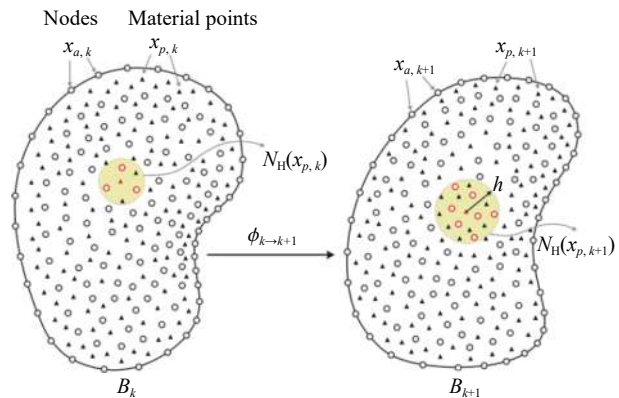


图 1 空间离散示意图^[17]

Fig. 1 Spatial discrete diagram^[17]

1.3 失效准则

OTM 法中通过删除失效物质点的方式来模拟裂纹的扩展以及破碎的形成。当某个物质点失效时,应力计算等过程中会将其忽略。对于失效的判定,OTM 法采用能量释放率 $G_{p,k+1}$ 作为其判定准则。能量释放率 $G_{p,k+1}$ 通过局部能量平均进行预估,定义如下

$$G_{p,k+1} = \frac{C_\varepsilon}{m_{p,k+1}} \sum_{x_{q,k+1} \in B_\varepsilon(x_{p,k+1})} m_q f_k(F_{q,k+1}) \quad (13)$$

式中: $B_\varepsilon(x_{p,k+1})$ 是以 $x_{p,k+1}$ 为中心、 ε 为半径的球,如图 2 所示; $F_{q,k+1}$ 为变形梯度; $m_{p,k+1}$ 是 ε 邻域的质量:

$$m_{p,k+1} = \sum_{x_{q,k+1} \in B_\varepsilon(x_{p,k+1})} m_q \quad (14)$$

当某物质点的能量释放率 ($G_{p,k+1}$) 大于临界能量释放率 (G_c),认为该物质点失效。临界能量释放率 G_c 刻画了单位面积下材料表面发生破碎所需要的能量。

2 铝球超高速撞击铝板算例分析

文献 [8] 采用基于拟流体模型的 SPH 新方法(拟流体 SPH 法)对铝球超高速撞击铝板进行了数值模拟,并与 Hiermaier 等的实验结果、传统 SPH 法和自适应光滑粒子流体动力学法 (adaptive smoothed particle hydrodynamics, ASPH) 的计算结果进行了对比。本节将采用 OTM 法对相同的算例进行模拟,并与文献 [8] 中的结果进行比较。

2.1 数值模拟模型

算例为直径 10 mm 的铝球和尺寸 40 mm×40 mm×2 mm 的铝靶板的超高速碰撞,撞击速度为 6.18 km/s。OTM 法的空间离散方式为:对几何模型划分网格,将网格节点作为 OTM 法中的节点,单元中心作为物质点。本算例中网格划分尺寸为 0.67 mm,离散结果如图 3 所示,共有 22 094 个节点,100 484 个物质点。

2.2 材料模型

超高速撞击需要考虑弹丸和靶材的应变率硬化和热软化等问题,因此选择能较好地模拟铝合金材料塑性响应的 J2 粘塑性模型 (J2-viscoplasticity)。

J2 粘塑性模型有效屈服应力为

$$\sigma_y(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p, T) = \sigma_0 \left(1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_0^p}\right)^n \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p}\right)^m\right] \left(1 - \frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^q \quad (15)$$

式中: ε^p 和 $\dot{\varepsilon}^p$ 为有效塑性应变和应变率, T 为绝对温度, σ_0 为参考温度下的初始准静态屈服应力, ε_0^p 和 $\dot{\varepsilon}_0^p$ 为参考有效塑性应变和应变率, T_m 为熔化温度, T_0 为参考温度, n 为强化指数, m 为应变率指数, q 为热软化指数,熔化温度 T_m 与变形相关,表达式为

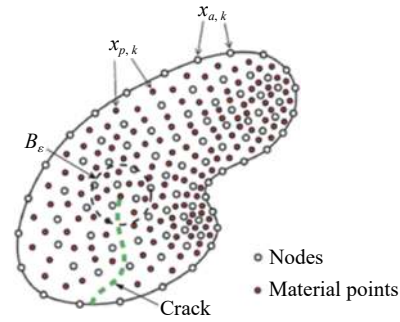
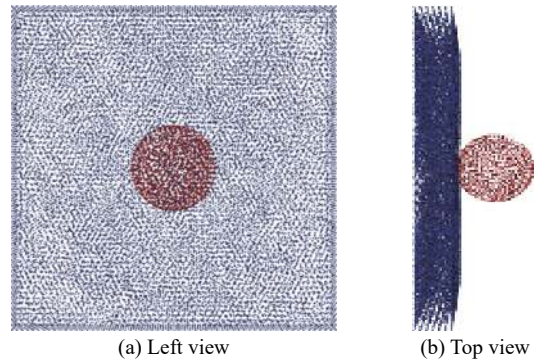


图 2 评估能量释放率的局部邻域^[15]

Fig. 2 The local neighborhood used to estimate the energy-release rate^[15]



(a) Left view (b) Top view

图 3 铝球撞击铝板离散模型

Fig. 3 Discrete model of aluminum ball impacting single aluminum plate

$$T_m(J) = T_{m0} \exp[2a(1 - J)] J^{2(\frac{1}{3} + a - \gamma_0)} \quad (16)$$

式中: $J=V/V_0$, V 为当前体积, V_0 为初始体积; T_{m0} 为参考熔化温度; γ_0 为参考体积下的 Grüneisen 参数, a 为常数。铝合金型号为 LY12, 材料参数如表 1 所示。本算例中依据文献 [8] 提供的材料信息进行了部分参数修改。式 (15) 和式 (16) 中提到的各参考系数的取值如表 2 所示。高温高压下材料的变形与温度、压力的关系采用 SESAME 状态数据库描述^[18]。

表 1 LY12 材料参数

Table 1 Material parameters of LY12

密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
2 700	68.9	0.33	896

表 2 J2 黏塑性模型参数

Table 2 Parameters of J2 viscoplasticity model

σ_0 /MPa	ϵ_0^p	$\dot{\epsilon}_0^p$	n	m	q	T_{m0} /K	a	γ_0
276	5×10^{-4}	1 000	0.075	0.08	0.5	925	1.5	1.97

2.3 结果分析

OTM 法能够很好地模拟内核碎片云的位置、外泡碎片云的形态以及反溅碎片云的形态等特征信息。特别是反溅碎片云的膨胀距离和宽度, 与实验很好吻合。一般的 SPH 法由于采用 Johnson-Cook 损伤模型而导致薄板屈服应力小于真实的屈服应力, 外溅碎片云的反溅程度过大, 与实验偏差较大(如图 4 所示)。

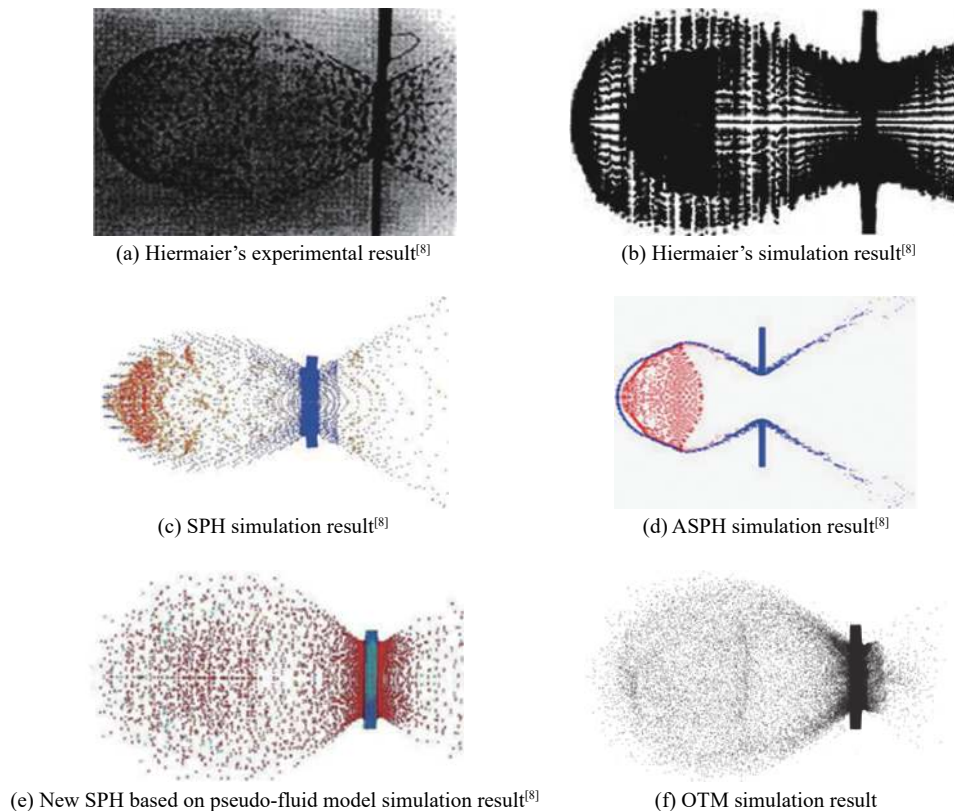


图 4 OTM 法与各类 SPH 方法计算结果对比

Fig. 4 Comparison of OTM and various SPH methods' simulation results

表3展示了相关实验和计算方法在弹孔直径 d (不包括弹孔边缘)、弹孔直径误差 ε 、碎片云膨胀距离 l 、碎片云膨胀宽度 w ，以及 l/w 及其相对误差 Δ 的对比结果。从该表中可以看出，OTM法预测的弹孔直径与真实实验中的弹孔直径最为相近，误差仅为4.7%；碎片云的膨胀距离与宽度之比的相对误差也是各类方法中最小的，说明了OTM法能很好地模拟出碎片云形态。

表3 铝球超高速撞击铝板结果对比

Table 3 Comparison of high-velocity impact results between aluminum projectile and plate

方法	d/mm	$\varepsilon/\%$	l/mm	w/mm	l/w	$\Delta/\%$
Hiermaier实验	27.5	-	-	-	1.39	-
Hiermaier模拟	35.0	27.3	-	-	1.11	-
SPH法	31.6	14.9	102.8	75.5	1.36	2.2
ASPH法	28.9	5.1	105.1	86.1	1.22	12.2
拟流体SPH法	29.4	6.9	105.7	81.4	1.30	6.5
OTM法	26.2	4.7	104.2	76.7	1.36	2.2

3 Whipple屏超高速撞击模拟

3.1 对比实验简介

文献[13]进行了一系列Whipple屏超高速撞击实验(如图5所示),球形弹丸直径0.4~0.5 cm,撞击速度4.47~6.15 km/s,撞击角度分为 0° 和 45° 两种。靶材间距为10 cm,厚度为0.192 cm。实验得到不同撞击速度和撞击角度下的弹孔尺寸、后墙损伤情况和碎片云激光阴影照片等结果。

3.2 数值模拟模型

本文按照对比实验建立模型,模拟了撞击角度为 0° 和 45° 两种情况。在划分网格时细化了缓冲墙和后墙的中心区域,最小网格尺寸为0.2 mm。在正撞模拟中,物质点共有340 382个,节点共有67 389个(如图6所示);在斜撞模拟中,物质点共有340 473个,节点共有67 401个。

弹丸和靶材的材料型号均为LY12,材料模型仍然使用J2粘塑性模型(材料参数见表1、表2)和SESAME状态方程。

3.3 结果分析

文献[13]进行了一系列不同撞击速度的Whipple屏正撞与斜撞实验。参数设置如表4所示。

OTM法采用相同的参数进行对应的数值模拟,实验与仿真中的缓冲墙弹孔尺寸对比结果如表5所示。其中后四组是斜撞实验,得到的弹孔呈现椭圆形,弹孔尺寸指的是椭圆的长轴和短轴。

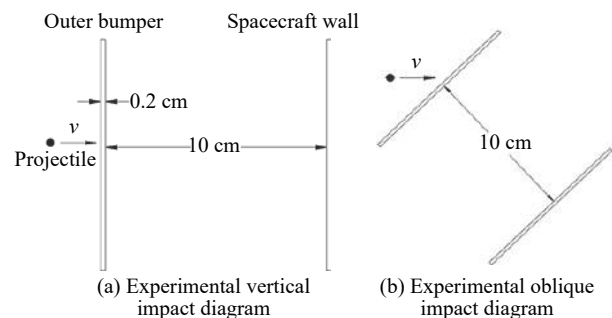


图5 实验模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental model

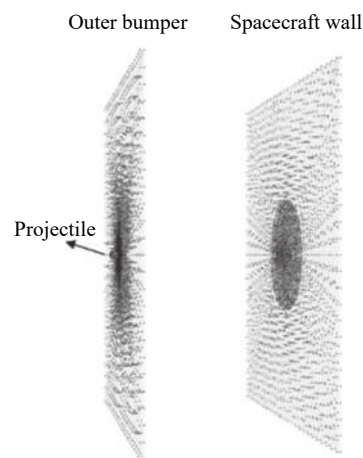


图6 Whipple屏超高速撞击数值模拟模型

Fig. 6 The numerical simulation model of Whipple shield hypervelocity impact

表 4 实验参数设置

Table 4 Parameters in experiments

实验	弹丸直径/mm	弹丸质量/g	缓冲墙厚度/mm	后墙厚度/mm	撞击速度/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	撞击角/($^\circ$)
04-0090	5.00	0.1797	1.92	1.94	5.29	0
04-0092	5.02	0.1826	1.94	1.90	5.52	0
04-0079	5.00	0.1810	1.94	1.92	6.08	0
04-0080	5.00	0.1811	1.92	1.90	6.15	0
04-0084	4.04	0.0972	1.92	1.90	5.95	45
04-0083	4.02	0.0960	1.92	1.94	6.02	45
04-0075	4.02	0.0958	1.92	1.90	4.47	45
04-0077	4.00	0.0940	1.92	1.94	4.74	45

表 5 缓冲墙弹孔尺寸对比

Table 5 Bullethole size comparison of outer bumper

实验	撞击速度/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	实验缓冲墙弹孔尺寸/mm	仿真缓冲墙弹孔尺寸/mm	相对误差
04-0090	5.29	11.5	10.5	8.69%
04-0092	5.52	11.7	10.9	6.84%
04-0079	6.08	12.4	11.2	9.68%
04-0080	6.15	12.6	11.8	6.35%
04-0075	4.47	10.6×8.5	10.9×8.99	2.83%×5.76%
04-0077	4.74	10.6×8.7	11.2×9.39	5.66%×7.93%
04-0084	5.95	11.6×10.2	12.3×10.1	6.03%×0.98%
04-0083	6.02	11.6×10.3	12.1×9.75	4.31%×5.34%

缓冲墙弹孔尺寸的模拟结果与实验吻合得较好,如在撞击速度 5.29 km/s 的实验中,弹孔直径为 1.15 cm,而仿真的结果为 1.05 cm,相对误差为 8.69%(如图 7 所示)。

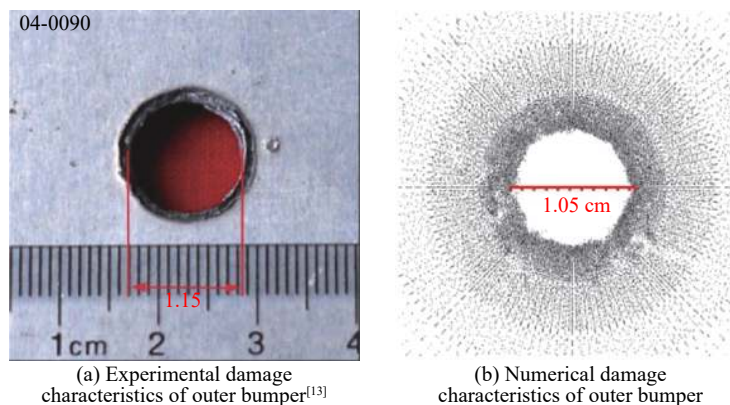


图 7 缓冲墙损伤对比图(撞击速度 5.29 km/s)

Fig. 7 Damage characteristics comparison chart of outer bumper (Impact velocity 5.29 km/s)

后墙的损伤形式一般有成坑、产生鼓包、层裂、剥落和穿孔^[19]。文献 [13] 只关注剥落和穿透,如图 8(a) 所示。图 8(b) 为 OTM 仿真中的剥落和穿透。

对比仿真与实验中后墙损伤情况(如表 6 所示),可见正撞仿真中,撞击速度越大,后墙的损伤越小。这是由于速度大的弹丸被缓冲墙破碎得更充分,形成了更小的碎片,减轻了对后墙的破坏作用。这与文献 [13] 中的结论一致。

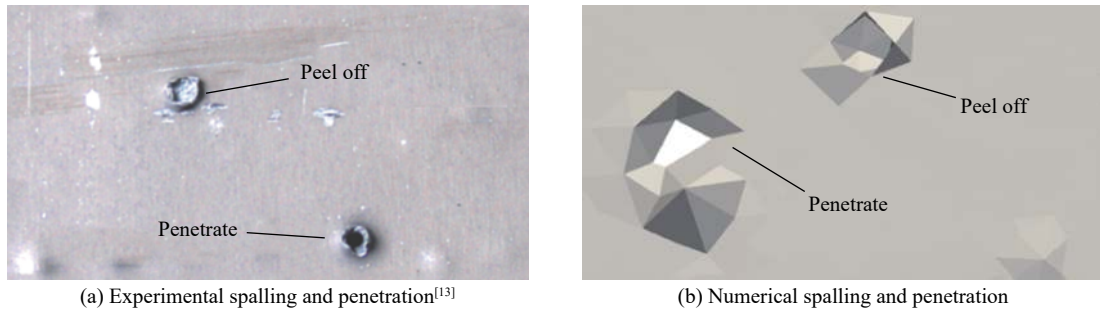


图 8 实验与仿真中的剥落和穿透

Fig. 8 Definitions of spalling and penetration in experiments and simulations

表 6 后墙损伤情况对比

Table 6 Damage comparison of spacecraft wall

实验	撞击速度/(km·s ⁻¹)	实验后墙损伤情况	仿真后墙损伤情况
04-0090	5.29	3处剥落, 无穿透	无剥落, 2处穿透
04-0092	5.52	2处剥落, 无穿透	5处剥落, 2处穿透
04-0079	6.08	无剥落, 无穿透	无剥落, 无穿透
04-0080	6.15	无剥落, 无穿透	无剥落, 无穿透
04-0075	4.47	无剥落, 2处穿透	无剥落, 无穿透
04-0077	4.74	无剥落, 无穿透	无剥落, 无穿透
04-0084	5.95	1处剥落, 1处穿透	无剥落, 无穿透
04-0083	6.02	1处剥落, 1处穿透	1处剥落, 无穿透

仿真显示, 弹丸碎片撞击到后墙上, 残余应力约为 150 MPa, 而撞击较严重的区域残余应力达到 300 MPa 以上, 如图 9 所示。

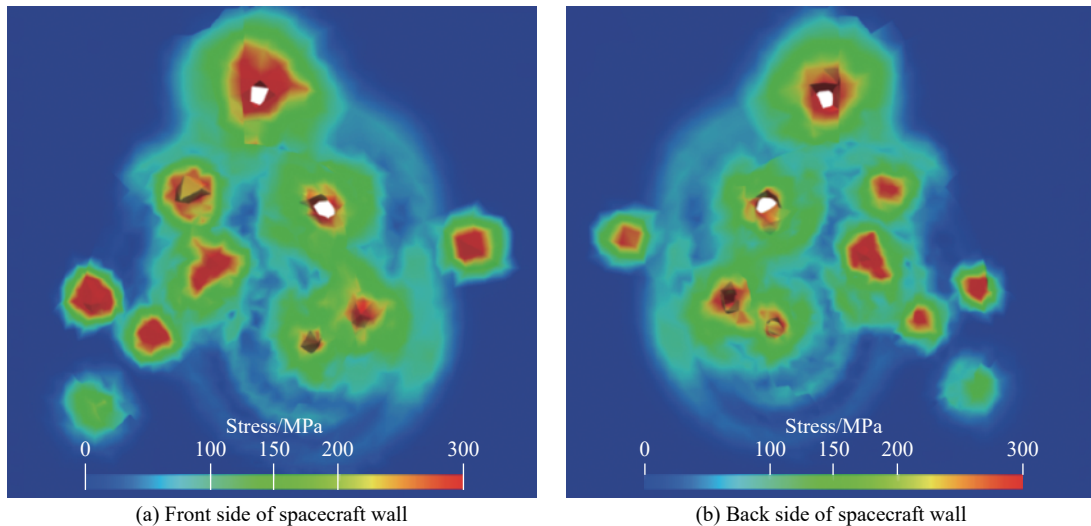


图 9 后墙损伤图 (撞击速度 5.29 km/s)

Fig. 9 Damage characteristics of spacecraft wall (impact velocity is 5.29 km/s)

目前超高速弹丸与 Whipple 防护屏撞击的数值模拟, 很难精确模拟出后墙的损伤情况。大部分后墙的损伤数据都来自于实验。文献 [8] 用拟流体 SPH 法对 Whipple 屏撞击的研究中, 也只给出了后墙的中心损伤区域, 缺乏对于后墙剥落与穿透等损伤状态的探究。由此可看出, OTM 法基于能量释放率的物质

点失效的方式, 在模拟材料的断裂损伤方面有着明显的优势。

OTM 法对 Whipple 屏的超高速撞击模拟不仅能模拟出弹丸穿透缓冲墙形成碎片这一过程, 还能很好地模拟出碎片云的形态, 包括碎片云呈现出头部椭圆形、尾迹扇形并有扩散趋势、碎片大多集中在头部和缓冲墙穿孔处等细节特征, 如图 10~11 所示。由于实验中的碎片云照片是采用激光阴影技术得到的, 细微的碎片无法在照片中显示, 因而实验中的碎片云轮廓较为清晰; 而 OTM 计算得到的碎片云对比图中, 所有碎片均有显示, 轮廓有一定发散性。

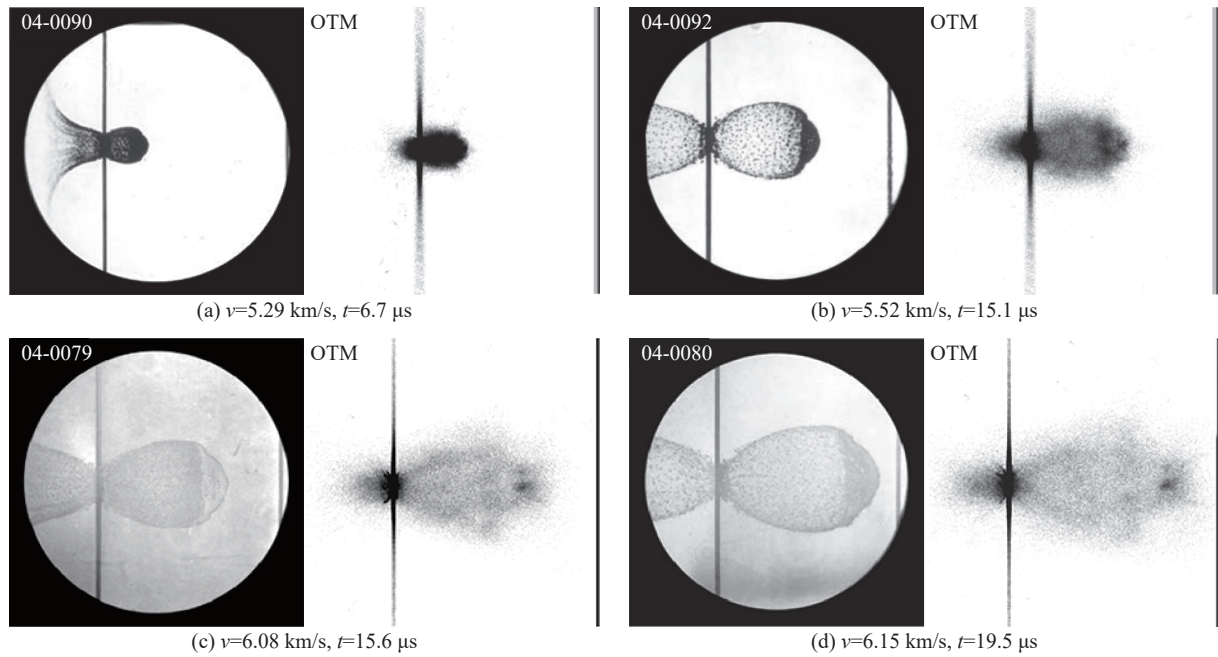


图 10 正撞碎片云对比图

Fig. 10 Fragment cloud comparison chart of vertical impact

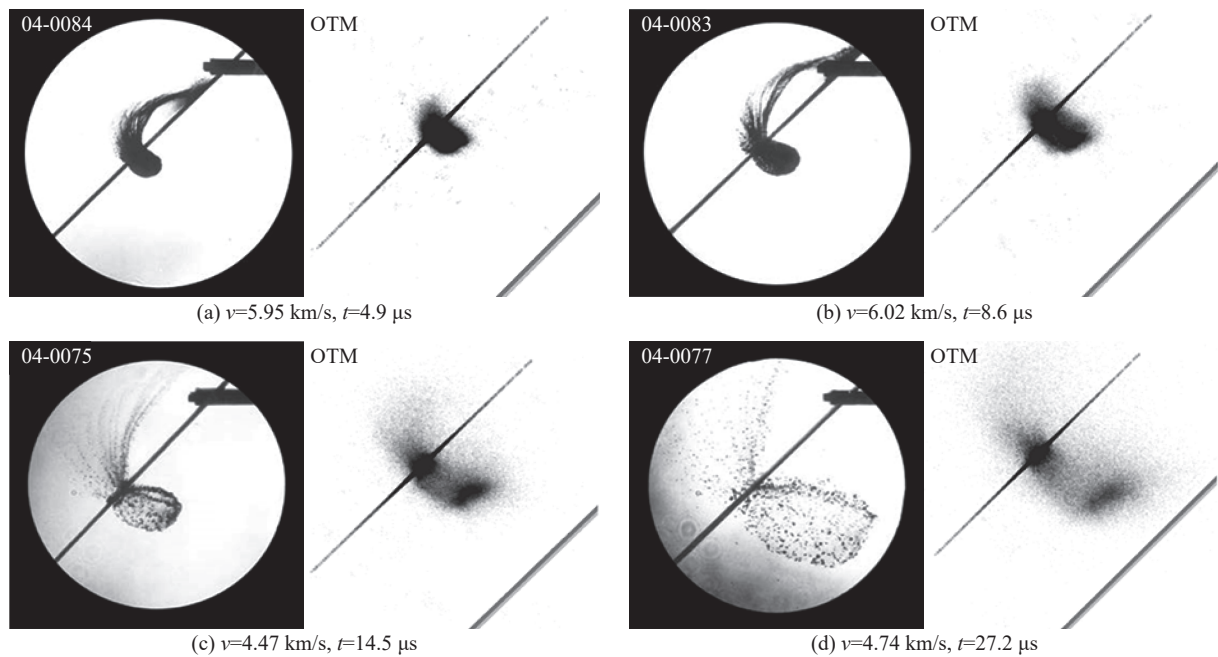


图 11 斜撞碎片云对比图

Fig. 11 Fragment cloud comparison chart of oblique impact

4 结 论

本文采用 OTM 法对铝球超高速撞击铝板和 Whipple 防护屏超高速撞击进行了数值模拟。通过铝球超高速撞击铝板这一验证算例,可看出 OTM 法能够为超高速撞击问题提供有效的数值模拟手段。在 Whipple 屏的超高速撞击模拟中,OTM 法能够很好地预测 Whipple 防护屏与弹丸撞击时缓冲墙和后墙的伤害情况,尤其在模拟后墙的剥落、穿透等损伤状态和破碎过程中碎片云的形态变化方面有着显著的优势,验证了其在超高速撞击数值模拟方面的适用性,为 Whipple 防护屏在航天防护方面的相关探究提供了有效的数值模拟手段。

参考文献:

- [1] CHRISTIANSEN E L, KERR J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26(1-10): 93-104. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00070-7.
- [2] 阎晓军, 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1328.2002.05.016.
YAN X J, ZHANG Y Z, NIE J X. Numerical simulation of the whipple shield under hypervelocity impact [J]. *Journal of Astronautics*, 2002, 23(5): 81-84. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1328.2002.05.016.
- [3] WHIPPLE F L. Meteorites and space travel [J]. *Astronomical Journal*, 1947, 52(5): 131.
- [4] 张婷婷, 魏强, 侯庆志, 等. 空间碎片高速撞击的数值模拟方法评述 [J]. *材料导报*, 2017, 31(S2): 438-442, 448.
ZHANG T T, WEI Q, HOU Q Z, et al. Review of numerical simulation methods for hypervelocity impact of space debris [J]. *Materials Review*, 2017, 31(S2): 438-442, 448.
- [5] QUAN X, BIRNBAUM N K, COWLER M S, et al. Numerical simulation of structural deformation under shock and impact loads using a coupled multi-solver approach [C] // *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures*. Hunan, China, 2003.
- [6] 闫晓军, 张玉珠, 聂景旭. 空间碎片超高速碰撞数值模拟的 SPH 方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(3): 351-354. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5965.2005.03.019.
YAN X J, ZHANG Y Z, NIE J X. Numerical simulation of space debris hypervelocity impact using SPH method [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(3): 351-354. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5965.2005.03.019.
- [7] 刘有英, 王海福. 高速碰撞下航天器防护结构效能评价 [J]. *弹箭与制导学报*, 2005, 25(4): 359-361. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2005.04.117.
LIU Y Y, WANG H F. Evaluations of high-velocity impact for spacecraft shields [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 359-361. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2005.04.117.
- [8] 强洪夫, 范树佳, 陈福振, 等. 基于拟流体模型的 SPH 新方法及其在弹丸超高速碰撞薄板中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 990-1000. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0990-11.
QIANG H F, FAN S J, CHEN F Z, et al. A new smoothed particle hydrodynamics method based on the pseudo-fluid model and its application in hypervelocity impact of a projectile on a thin plate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 990-1000. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0990-11.
- [9] FERNÁNDEZ-MÉNDEZ S, HUERTA A. Imposing essential boundary conditions in mesh-free methods [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(12/13/14): 1257-1275. DOI: 10.1016/j.cma.2003.12.019.
- [10] 尹晓文. 物质点法在 Whipple 防护结构高速冲击中的应用研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [11] ACIN M. SPH-Introduction to a meshless method [DB/OL]. [2015-06-13]. <http://www.acin.net/2015/06/13/sph-introduction-to-a-meshless-method/>.
- [12] LI B, HABBAL F, ORTIZ M. Optimal transportation meshfree approximation schemes for fluid and plastic flows [J].

- [International Journal for Numerical Methods in Engineering](#), 2010, 83(12): 1541–1579. DOI: 10.1002/nme.2869.
- [13] 柳森, 李毅, 黄洁, 等. 用于验证数值仿真的 Whipple 屏超高速撞击试验结果 [J]. [宇航学报](#), 2005, 26(4): 505–508. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1328.2005.04.024.
- LIU S, LI Y, HUANG J, et al. Hypervelocity impact test results of Whipple shield for the validation of numerical simulation [J]. [Journal of Astronautics](#), 2005, 26(4): 505–508. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1328.2005.04.024.
- [14] ARROYO M, ORTIZ M. Local maximum-entropy approximation schemes [M] // GRIEBEL M, SCHWEITZERM A. *Meshfree Methods for Partial Differential Equations III*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. DOI: 10.1007/978-3-540-46222-4_1.
- [15] LI B, KIDANE A, RAVICHANDRAN G, et al. Verification and validation of the optimal transportation meshfree (OTM) simulation of terminal ballistics [J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2012, 42: 25–36. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.11.003.
- [16] KANE C, MARSDEN J E, ORTIZ M. Symplectic-energy-momentum preserving variational integrators [J]. [Journal of Mathematical Physics](#), 1999, 40(7): 3353–3371. DOI: 10.1063/1.532892.
- [17] JIANG F, LIAO H M, KE R J, et al. A monolithic Lagrangian mesh free scheme for fluid-structure interaction problems within the OTM framework [J]. [Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering](#), 2018, 337: 198–219. DOI: 10.1016/j.cma.2018.03.031.
- [18] 林健宇, 罗斌强, 徐名扬, 等. 铝弹丸超高速撞击防护结构的研究进展 [J]. [高压物理学报](#), 2019, 33(3): 030112. DOI: 10.11858/gywlb.20190774.
- LIN J Y, LUO B Q, XU M Y, et al. Progress of aluminum projectile impacting on plate with hypervelocity [J]. [Chinese Journal of High Pressure Physics](#), 2019, 33(3): 030112. DOI: 10.11858/gywlb.20190774.
- [19] 管公顺, 朱耀, 迟润强, 等. 铝双层板结构撞击损伤的板间距效应实验研究 [J]. [材料科学与工艺](#), 2008, 16(5): 692–695. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0299.2008.05.025.
- GUAN G S, ZHU Y, CHI R Q, et al. Experimental investigation of space effect on damage of aluminum dual-wall structure by hypervelocity impact [J]. [Materials Science and Technology](#), 2008, 16(5): 692–695. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0299.2008.05.025.

(责任编辑 王小飞)