小行星SPH建模技术和超高速碰撞

李兴汉，张 舵，杨飞鸿，王新宇，冉宪文
（国防科技大学 理学院，长沙 410073）

摘 要：针对小行星几何形状复杂、建模效率低、碰撞动量传递机理不明晰等问题，开发了基于包围体层次（Bounding Volume Hierarchy，BVH）加速的体素化建模方法，通过光滑粒子流体动力学方法（Smoothed Particle Hydrodynamics，SPH）计算分析了超高速碰撞下动量传递的规律。研究结果表明：相对于GPU（Graphics Processing Unit）体素化建模方法，研究采用BVH体素化方法，效率提升86.8%，单元识别准确率达96.5%，粒子质量误差小于3.5%；撞击角度与动量传递因子强相关，60°撞击时取得最大值3.82，较30°撞击提升41.7%；喷出物反冲效应贡献了小行星68.3%的动量变化。本研究证实BVH体素化方法可高效处理内凹几何体（建模速度达传统方法的7.3倍），60°撞击角度能最大化碎石堆结构小行星的动量传递效率（$\beta > 3.5$），所建技术链可推广至千米级天体防御场景，为多拦截器协同轨道优化提供关键工具支持。

关键词：小行星防御；体素化建模；动量传递因子；超高速碰撞；轨道偏移
中图分类号：V41 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9287(2026)03-0276-11
DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20250109
引用格式：李兴汉，张舵，杨飞鸿，等. 小行星SPH建模技术和超高速碰撞[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（3）：276-286.
Reference format: LI X H，ZHANG D，YANG F H，et al. Asteroid modeling technology and hypervelocity collisions[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（3）：276-286.

引 言

天文学定义近日点距离 < 1.3 AU，距离地球轨道最小距离在0.3 AU范围内的小行星为近地小行星（Near-Earth Asteroid，NEA），其在空间中的数量并不稀少，截至2024年8月，已发现的近地小行星数量为35 557颗[1]。一颗直径为1 km的小行星以典型撞击速度（1.7×10^4 m/s）与地球碰撞，可释放约4.87×10^4 Mt的动能，相当于约4.9万枚百万吨三硝基甲苯（TriNitroToluene，TNT）当量核武器同时爆炸。

一般认为，如果小天体轨道与地球轨道的最小距离 < 0.05 AU，就存在潜在碰撞风险。如果碰撞发生在人口稠密的地区，几十米直径的小天体也可能造成非常严重的后果[2-5]。随着未来深空航天技术的发展，对近地小天体活动范围内类似目标的监视也势必成为国防领域的重点[6-7]。

美国在小行星防御研究方面开始较早，其“双小行星重定向测试”（Double Asteroid Redirection Test，DART）任务于2022年9月成功撞击小行星迪蒂莫斯的子星狄莫弗斯，改变了其绕母星公转的周期[8-10]。欧洲航天局（European Space Agency，ESA）的赫拉（Hera）任务将对DART任务的撞击目标开展进一步详细勘察。此外，欧美等国家和地区还提出了若干基于动能撞击的概念任务，如欧洲依托“地平线 2020”项目提出的近地天体护盾任务概念[11-12]。中国正在规划对一颗小行星实施动能撞击演示验证任务，验证小行星防御方案可行性[13]。

超高速碰撞是小行星防御的主要物理力学手段，其研究的数据可以提供在面对小行星撞击如何使用拦截器进行有效拦截和防御。通过建立动力学碰撞的数值模拟来研究。目前光滑粒子流体动力学方法（Smoothed Particle Hydrodynamics，SPH）已经可以应用于模拟脆性固体的断裂，并对小行星的撞击解体进行模拟计算。Willy Benz等[14-15]通过SPH建模方法对小行星超高速撞击过程进行模拟，揭示了材料特性和内部结构对撞击毁伤结果的影响，以及撞击成坑过程的溅射物规律。焦艺菲等[16]使用数值模拟软件THU-SPHSOL，研究了不同参数组合对撞击结果的影响，为中国即将开展的小行星撞击防御任务提供参考；周强等[17]分析了动能撞击防御小行星的关键指标参数，评估不同撞击器建模方式对撞击响应仿真结果的影

收稿日期：2025-10-28 修回日期：2025-12-31
基金项目：国家自然科学基金（11972371）

响，运用 SPH - DEM 方法模拟特定的撞击事件，如对岩石堆小行星Dimorphos 上进行的双小行星重定向测试撞击事件的模拟，成功再现了动量传递和质量喷出的观测结果，并预测了撞击形成的陨石坑大小和目标的全球重塑情况。

本文基于2024YR4小行星超高速撞击，速度是> 3 km/s，进行数值模拟，建立SPH模拟值，得出规律为后续小行星防御任务提供关键数据与理论支持。

1　小行星与超高速碰撞

1.1　小行星防御概述

在小行星防御技术领域，主要应对策略可划分为轨道偏移（Orbital Deflection）与碎裂解体（Disruptive Fragmentation）两类，参见表1。轨道偏移旨在通过施加外部作用力改变目标天体的运行轨迹，使其偏离与地球的交会轨道，从而避免碰撞事件的发生；而碎裂解体则依赖于动能撞击或核爆等手段使目标天体破碎，通过瓦解成碎片群以偏离原轨道或降低其整体撞击危害。

表 1　各项防御技术

Table 1　Various defense technologies

技术	缺点	应用目标
动能撞击器	对碎石堆型小行星效能较低	<500 m；结构致密的天体
核爆炸装置（NED）	碎片污染；国际条约限制	>500 m；紧急级威胁
引力牵引器	需超长部署时间（>10 a）	<300 m；早期预警场景
激光烧蚀	需天基大规模能源（如核动力）	<200 m；金属/岩石质天体

由于碎裂策略所引发的动力学响应存在显著不确定性，例如碎片云的演化过程难以精确预测与控制，其在防御效果可靠性方面面临较大挑战。因此，在预警时间充足的条件下，轨道偏移策略通常被认为具备更高的可行性与控制性。

此外，依据作用时间尺度的不同，小行星轨道干预技术还可区分为快速防御与缓慢防御两种类型。

快速防御技术主要依赖于超高速撞击爆炸，适用尺寸相对较小预警时间短的小行星，或者尺寸相对较大预警时间长的小行星[18]，如美国于2022年执行的DART任务：撞击直径160 m的Dimorphos小行星，轨道周期缩短33 min（远超预期10 min）；技术扩展：核爆拦截方案（针对>500 m级威胁）。

缓慢防御技术主要通过拦截器与小行星交会，对小行星产生一个长期的作用力，改变小行星速度，同时改变轨道[19]。小行星微小的速度变化随着时间的推移，轨道会发生巨大的变化[20]。

1.2　超高速碰撞概述

本文采用lsdyna建模及限元仿真技术，模拟使用拦截器在太空中拦截2024YR-4小行星。当拦截器与小行星在近地面太空中超高速碰撞，其产生的爆炸威力无法估量。拦截器撞击小行星目标将产生复杂的侵彻、开坑和反溅现象，同时引发局部相变（如熔化和气化），并伴随着动量交换过程，该动量传递机制构成小行星防御的理论基础[20]。超高速碰撞通常指相对速度超过每秒数千米的撞击，本文聚焦3 ～10 km/s范围。在此条件下，拦截器与小行星的动能会在极短时间内转化为巨大的热能、冲击波和碎片云，从而产生类似核爆的高能释放效应。

小行星进入地球大气的过程中，主要存在以下物理特征：空中解体爆炸波及其引起的地面超压和风，火球的光辐射、热辐射。空中爆炸是小行星进入大气过程显著的现象之一[21-22]。空中爆炸发生时，爆炸波向地面传播，在地面形成超压，爆炸波波前的后面的低压区因周围空气的补充形成风，对地面人员和设备造成危害。Chelyabinsk流星事件中，大量建筑物窗户的玻璃受到地面超压的破坏而震碎[23]。在Tunguska流星事件后，发现地面大范围的树木呈幅状倒伏且未收集到陨石，研究者认为这是地面超压造成的[24]，在小行星物理中，把超高速飞行以及空中爆炸产生的高温流场称为“火球”。火球能够产生较强的光辐射，可被肉眼或仪器观测到，是小行星撞击地球最显著的特征。光辐射数据通常可转换为能量沉积数据[25-26]，是小行星进入地球大气过程最重要的观测数据之一。

材料失效通常由累积损伤模型描述，损伤变量 D（$0 \leqslant D \leqslant 1$）演化方程可表示为

$$D = f(\sigma, \varepsilon, T, \cdots) \tag{1}$$

当D达到临界值（通常为1）时，材料单元失效，失去承载能力并可能转化为碎片。

太空是真空环境，碰撞能量不会像在地球大气层中那样通过空气冲击波扩散，而是主要通过高温等离子体、辐射和高速溅射碎片的形式释放。如果拦截器以10 km/s以上的速度撞击2024YR4，其动能等效于数千吨TNT当量，可以有效改变小行星的轨道或使其部分碎裂。但是碰撞可能引发小行星内部结构的连锁反应，导致其局部甚至整体崩解。

2　数值仿真分析

2.1　拦截器的数据特性

在太空中超高速撞击2024YR4小行星，材料选择

最关键，拦截器材料选择7075-T651铝合金中Al-Zn-Mg-Cu系，这种材料具有优异的高强度、重量比、良好的动态力学性能和抗冲击能力，是高速碰撞拦截任务的理想选择。7075-T651铝合金广泛应用于航空航天结构件、导弹壳体、装甲防护及高应变率冲击场景，其经过T651热处理，固溶、人工时效后，抗拉强度可达570 MPa以上，屈服强度超过500 MPa，同时保持较低的密度，使拦截器在超高速碰撞时兼具结构强度和动能传递效率。这些数值在LS-DYNA仿真软件的参数设置如表2所示。

表 2 铝合金材料属性设置[27]

Table 2 Aluminum alloy material property settings[27]

密度/（g·cm^{-3}）	剪切模量/Mbar			熔点/K
2.8	0.95			877
有效塑性应变率/μs	比热容/（Mbar·cm^3/（g·K））			损伤参数
1.0×10^6	880 000			0.78
A	*B*	*C*	*M*	*N*
0.003 7	0.034 3	0.01	1	0.41
状态方程				
GRUNEISEN				

7075-T651铝合金在高速冲击下主要表现为延性变形、绝热剪切及热软化效应。Johnson-Cook模型能够有效刻画7075铝合金在高速撞击过程中的动态屈服、塑性流动以及因温升引起的强度退化现象，适用于模拟拦截器在撞击中的侵彻行为、变形模式与能量耗散过程。该模型通过乘积形式耦合了应变硬化、应变率强化和温度软化效应，其流动应力表达式为

$$\sigma=\left[A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{N}\right]\left[1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right]\left[1-T^{*M}\right] \tag{2}$$

其中：A，B，C，N，M为材料参数；ε_{p}为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}$为塑性应变率，$T^*$为无量纲温度。Johnson-Cook本构模型能有效表征高应变率（$10^3\sim10^6$ s^{-1}）和高温软化效应下的弹塑性响应[26]。要描述7075铝合金在高速撞击下的动态屈服、塑性流动及由于温升导致的强度退化，需要与GRUNEISEN 状态方程耦合。GRUNEISEN 状态方程形式如下

$$P=\frac{\rho_0C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{\alpha}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{1+\mu}-S_3\frac{\mu^3}{(1+\mu)^2}\right]^2}+(\gamma_0+\alpha\mu)E \tag{3}$$

其中：ρ_0为初始密度；C为材料声速；$\mu=(\rho/\rho_0)-1$为体积应变；γ_0为GRUNEISEN系数；S_1、S_2、S_3为冲击压缩参数；α为γ随体积变化的系数；E为比内能。

JC 模型提供应力张量中的偏应力分量（描述剪切变形），状态方程提供球应力分量（描述体积压缩/膨胀与压力），二者通过弹性张量叠加得到总应力张量，从而实现对超高速碰撞中材料塑性流动、高压压缩、温升软化等多物理场耦合效应的精准模拟，适用于拦截器的冲击侵彻、变形及能量耗散过程的全工况仿真。

2.2 2024YR-4小行星数据特性

对于2024YR-4的观测揭示了其物质组成特性，密度较低且内聚强度极弱，表明其本质上是一个由碎石松散聚集而成的“碎石堆”（rubble pile）结构，其组成材质更接近地质类脆性材料（如岩石、混凝土），具有明显的压力相关强度、体积压缩效应以及损伤累积导致的材料退化。这种结构对撞击的响应与传统固体岩石截然不同，根据现有研究经验使用Holmquist-Johnson-Cook模型[26]。Holmquist-Johnson-Cook模型专为混凝土和地质材料设计，后经扩展应用于小行星等脆性天体物质的冲击模拟。该模型包含了三项式的状态方程（EOS）描述压力−体积−能量关系、强度模型描述剪切行为以及损伤演化模型描述材料破碎与失效。2024 YR4小行星关键轨道参数如表3，模型各种属性数据如表4所示。

表 3 小行星关键轨道参数[28]

Table 3 Key orbital parameters of asteroids[28]

小行星名称	轨道类型	半长轴/AU
2024 YR4	Apollo（近地天体）	2.515 854 1
轨道周期/a	平均每日运动（°/d）	提塞朗参数
3.99	0.246 988	3.1
偏心率	相对地球的Δ*V*/（km·s^{-1}）	
0.661 546 2	7	

表 4 小行星材料属性设置[29]

Table 4 Settings for material properties of asteroids[29]

密度/（g·cm^{-3}）	剪切模量/Mbar	熔化温度/K	EPSI
3.07	1.9×10^7	877	2
比热/Mbar·cm^3·（g·K^{-1}）	破坏参数	抗拉强度/Mbar	Hugoniot 弹性极限/Mbar
8.8×105	0.78	0.005 5	0.13
PHEL/Mbar	BETA	*A*	*B*
0.059	1	1.03	0.68
C	*D*1	*D*2	*K*1
0.004	0.48	0.48	2.047 9
M	*N*	状态方程	
0.76	0.85	GRUNEISEN	

状态方程描述压力P与体积应变μ和比内能E的关系

$$P=K_1\mu+K_2\mu^3+K_3\mu^5+\Delta P \tag{4}$$

其中：K_1、K_2、K_3为材料常数；ΔP为由于内能增加

导致的压力增量。

归一化等效强度表示为

$$\sigma^* = [A(1-D)+B(P^*)^n][1+\ln(S^*)] \tag{5}$$

其中：A、B、C、N为强度常数；$P^* = P/I_0$为归一化压力；$S^* = s/s_0$为归一化应变率；D为损伤变量（$0 \leqslant D \leqslant 1$）。

损伤演化模型表示为

$$\Delta D = \sum(\Delta\sigma + \Delta\rho\sigma)(\sigma f + \mu f) \tag{6}$$

损伤导致材料强度和刚度退化，当$D = 1$时材料完全失效。

2.3　高超速碰撞模型构建仿真

美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）国际组织发布的潜在威胁小行星数据共2 400多个，现已经通过观测获得数据曲线的小行星有1 000多个，本研究基于2024YR4小行星的外形数据进行建模与仿真分析。利用NASA官网数据结合Blender与LS-PREPSOT对2024YR-4进行建模，2024YR4小行星外形图如图1，仿真图如图2所示。

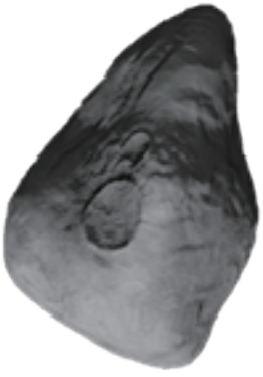


图 1　2024YR4小行星外形图[28]
Fig. 1　Shape of Asteroid 2024YR4[28]

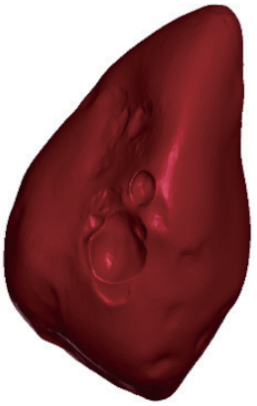


图 2　2024YR4小行星外形仿真图
Fig. 2　Simulation of shape of asteroid 2024YR4

2.4　小行星建模与Python程序思路

由于小行星几何模型较复杂，进行SPH建模较困难，设计利用Python脚本对k文件做处理，构建完全相同的小正方体体素化模型，再于LS-PREPOST内进行SPH建模。参考多视角小行星观测图像，使用Blender进行建模。建模过程包括：①图像对齐与比例校准；②创建基础几何体（如球体或椭球体）；③细化表面特征，包括陨石坑生成、表面凹凸细节处理及整体形态调整。

输出高保真三角网格外壳（STL格式），将STL文件导入LS-PREPOST，建立长方体包裹填充整个外壳，对长方体进行网格划分，输出k文件并保留材料属性定义。设计Python程序，开发了基于包围体层次结构（Bounding Volume Hierarchy，BVH）加速的并行识别程序，核心计算流程图3所示。

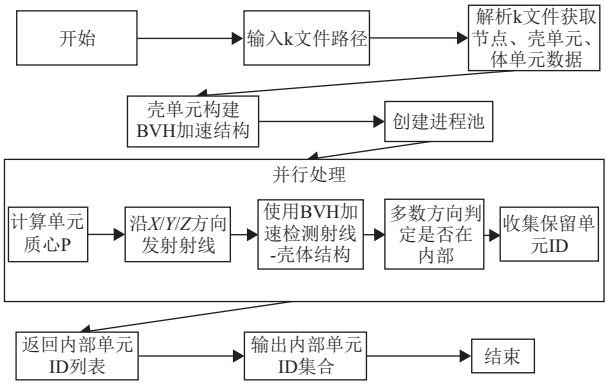


图 3　Python计算程序流程
Fig. 3　Python program flow calculation

BVH空间加速将射线检测复杂度从$O(N)$降至$O(\log N)$，通过多方向投票机制消除奇异方向误差，根据数据大小自动调节任务块大小。对比传统体素化方法（Graphics Processing Unit，GPU）（原始射线方法）效率提升86.8%，单元识别准确率达96.5%，粒子质量误差小于3.5%，对比测试模型为包含约200万个三角面片的2024YR4小行星网格。实现细节对比如表5所示。

表 5　实现细节对比
Table 5　Comparison of implementation details

实现方面	原始射线法	BVH方法
数据结构	简单的三角形列表	层次树（节点 + 叶子）
预处理	无	需要构建BVH树
核心算法	Möller-Trumbore相交检测	递归树遍历 + 相交检测
内存访问	随机访问	局部访问

Python程序对k文件处理后体素化模型如图4所示，SPH模型如图5所示。

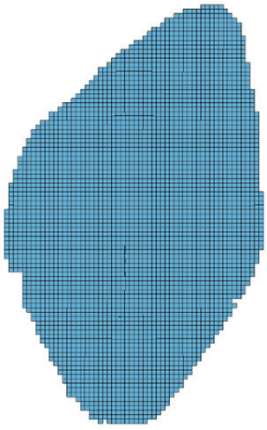


图 4 体素化模型
Fig. 4 Voxelization model

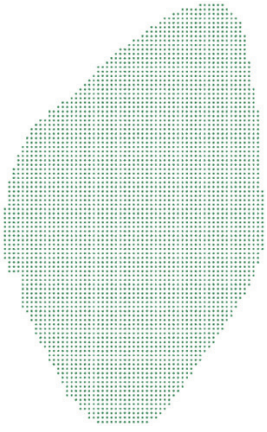


图 5 SPH模型
Fig. 5 SPH model

2.5 仿真模型简化

本仿真采用cm–g–μs一致单位系统。所有后续输出的速度场、动量、动能等物理量的数值均基于该单位系统。图7~16中所示速度云图单位均为cm/μs。

动能撞击的核心物理过程可以通过动力学方程进行描述。根据NASA的DART任务数据[30]，当质量为m_i的拦截器以相对速度$\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}}$撞击目标小行星时，拦截器的初始相对动量$\Delta\boldsymbol{p}_0$可表示为

$$\Delta\boldsymbol{p}_0 = m_i\boldsymbol{v}_{\mathrm{rel}} \tag{7}$$

然而实际观测数据表明，由于撞击产生的喷出物效应，总动量传递存在显著放大。引入动量传递因子β量化这一现象

$$\beta = \frac{\Delta p_{\mathrm{total}}}{\Delta p_0} = 1 + \frac{m_{\mathrm{e}}v_{\mathrm{e}}}{m_i v_{\mathrm{rel}}} \tag{8}$$

其中，m_{e}和v_{e}分别代表喷出物质量和平均喷射速度。DART任务中观测到β值介于2.2～4.9之间，意味着喷出物贡献的动量远超撞击器本身。

在超高速撞击的过程中，撞击器携带的巨大动能会在极短时间内传递给靶体。焦艺菲等[16]利用THU-SPHSOL软件进行的小天体撞击仿真，通过追踪物质来源展示了撞击坑的形成和周边靶材的喷射过程，表明喷溅物绝大部分由小行星表面和浅表层物质构成。DART任务的实测数据进一步证实，撞击产生的喷溅物总量远超撞击器自身质量，动量放大效应显著，有力地证明了靶材贡献的主导地位[30]。

为研究喷出物贡献的动量设计了以下仿真实验，鉴于拦截器（其构型特征与典型火箭/导弹类航天器相似）与目标小行星之间存在显著的尺度差异（scale disparity），本次仿真采用了合理的几何简化策略以提升计算效率。具体而言，由于撞击瞬间接触区域的局部曲率极低（撞击接触面积相对于小行星表面积可忽略不计，量级约10^{-4}）且应力波传播时间远小于整体结构响应时间，可将小行星的撞击局部区域近似处理为半无限大弹性半空间（semi-infinite elastic half-space）模型。该模型未考虑小行星整体几何曲率对应力波传播路径的影响，亦未模拟边界反射波对喷出物运动的干扰，在实际撞击中，喷出物受小行星表面曲率与重力梯度影响呈非对称分布，而半无限模型则默认表面为平面。由于忽略整体动量守恒与角动量耦合，β值可能存在约10%～15%的高估趋势。为进一步提升仿真精度，未来工作将引入曲率修正因子$\kappa(R, r_c)$与边界反射模型，构建“局部–整体”耦合仿真框架，以更真实地反映小行星几何与结构对撞击响应的影响。

简化撞击模型如下图6所示，SPH粒子间距为1.2 cm，拦截器粒子间距为1 cm。

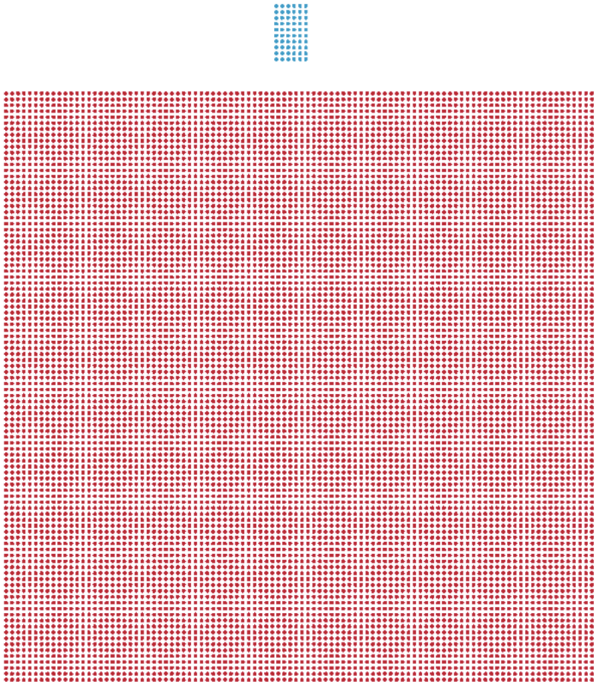


图 6 简化撞击模型
Fig. 6 Simplified impact model

2.6　仿真计算结果

2.6.1　撞击角度对动量传递的影响

拦截器被简化为铝合金材质的刚性圆柱体（长径比$\gamma = 3.2$）。此简化模型在有效保留撞击核心物理机制（如动量传递、能量耗散）的同时，显著降低了数值模拟的计算复杂度（计算时长缩减约 78%）。 系统模拟了不同入射角（$\theta = 0° \sim 90°$），初始速度为6 km/s工况下的撞击过程。部分关键工况的数值模拟结果如图7～12所示。

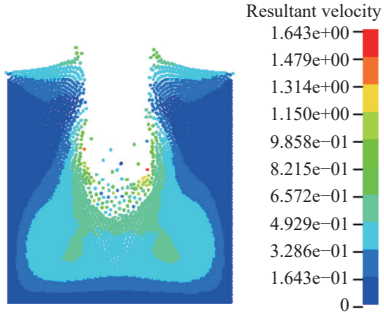


图 7　0°撞击后速度

Fig. 7　Velocity after a 0° impact

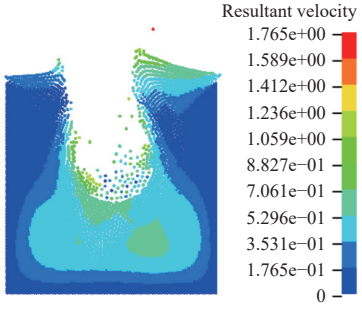


图 8　15°撞击后速度

Fig. 8　Velocity after a 15° impact

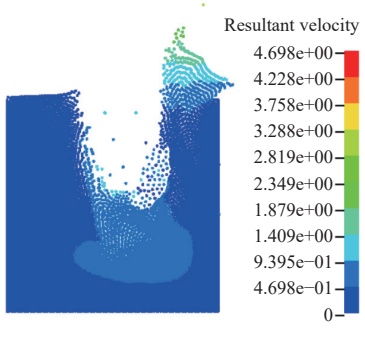


图 9　30°撞击后速度

Fig. 9　Velocity after a 30°impact

由图7～12可知撞击角度θ（定义为速度矢量与表面法线的夹角）对动量传递效率有决定性影响。表明：

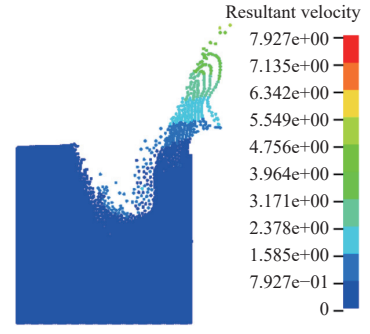


图 10　45°撞击后速度

Fig. 10　Velocity after a 45° impact

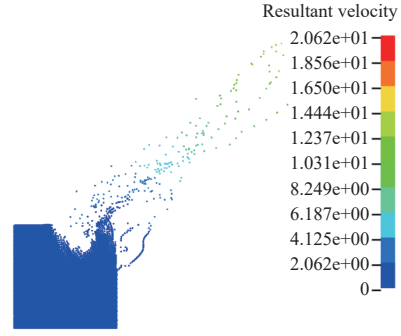


图 11　60°撞击后速度

Fig. 11　Velocity after a 60° impact

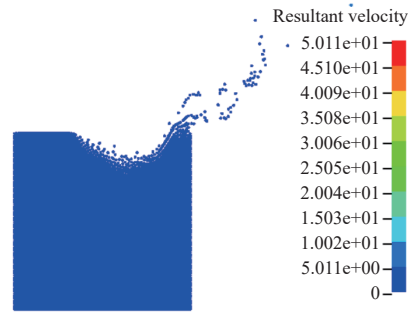


图 12　75°撞击后速度

Fig. 12　Velocity after a 75° impact

1）临界角度撞击（$60° < \theta < 90°$）：喷出物主要沿切向飞散，动量传递效率较低；

2）近垂直撞击（$30° < \theta < 60°$）：产生对称溅射锥，β值显著提升；

3）低角度撞击（0°～30°）：β值随角度增加呈指数增加，

$$\beta(\theta) \propto e^{-k(30°-\theta)} \tag{9}$$

其中，k为材料相关衰减系数，该指数衰减关系反映了随着撞击角度偏离最优范围，有效法向动量分量减少而切向滑动效应增强的物理机制。

由图12可知，此时出现跳弹现象，能量分散严重，喷出物逃逸率低，β较小，故75°以上未纳入仿真

模拟范围。

2.6.2 撞击速度对动量传递的影响

为进一步探究超高速撞击中速度参数对动量传递效率的影响，本小节在固定撞击角度$\theta = 60°$（前述最优角度）条件下，系统开展了不同撞击速度v_i的数值仿真实验。选取速度梯度为$v_i = 3\,579$ km/s，覆盖典型拦截任务的速度范围，以揭示速度与动量传递因子β及喷出物贡献之间的量化关系。仿真结果图13～16所示。

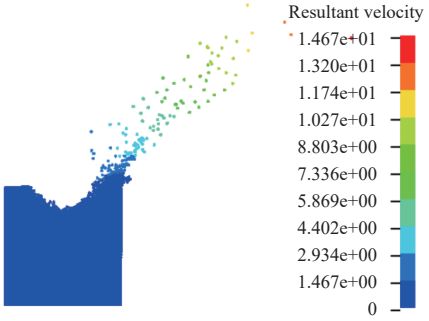


图 13 3 km/s撞击后速度

Fig. 13 Velocity after 3 km/s impact

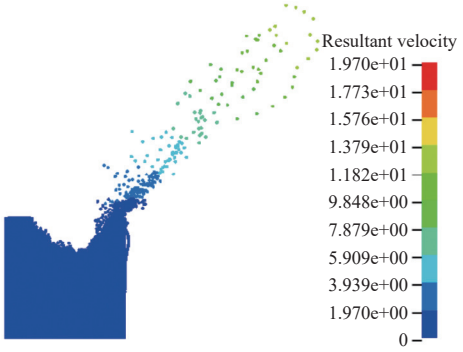


图 14 5 km/s撞击后速度

Fig. 14 Velocity 5 km/s impact

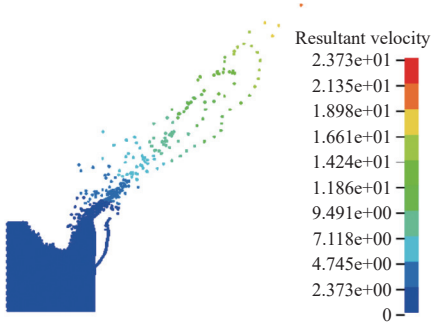


图 15 7 km/s撞击后速度

Fig. 15 Velocity after 7 km/s impact

仿真结果（图13～16）表明，在3～9 km/s速度范围内，动量传递效率随撞击速度提升而显著增强。当$v_i = 9$ km/s时，β值达到4.30，较$v_i = 3$ km/s时提升34.4%。这一趋势可由能量分配机制解释：在较低速度下，撞击能量主要用于靶体塑性变形与开坑过程；随着速度提升，更多能量转化为喷出物动能，推动β值上升。喷出物贡献率$f_e = m_e v_e/(m_i v_i)$从3 km/s时的68.3%增至10 km/s时的74.2%，表明在更高速度下喷出物反冲效应对动量传递的主导作用进一步增强。

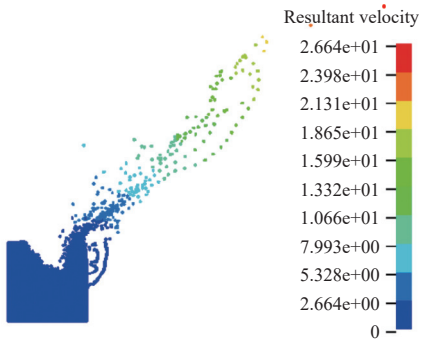


图 16 9km/s撞击后速度

Fig. 16 Velocity after 9 km/s impact

2.7 缩比动力学模型

对于2024YR4这类阿波罗型近地小行星，其轨道参数需用椭圆轨道方程描述

$$\frac{d^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} = -\frac{GM_\odot}{\boldsymbol{r}^3}\boldsymbol{r} + \sum \boldsymbol{a}_{\mathrm{pert}} \tag{10}$$

其中：$\boldsymbol{r}$为小行星位置矢量；t为时间；G为万有引力常数；$M_\odot$为中心天体质量；$\sum \boldsymbol{a}_{\mathrm{pert}}$为除中心引力之外摄动加速度总和。

采用光滑粒子流体动力学（SPH）方法模拟撞击过程时，系统动力学方程可表述为

$$\begin{aligned} \frac{D\rho}{Dt} &= -\rho\nabla\cdot\boldsymbol{v} \\ \frac{D\boldsymbol{v}}{Dt} &= -\frac{\nabla P}{\rho} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{art}} \\ \frac{Du}{Dt} &= \frac{P}{\rho^2}\frac{D\rho}{Dt} + \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{visc}} \end{aligned} \tag{11}$$

其中：ρ为密度；$\boldsymbol{v}$为速度场；P为压力；u为比内能；$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{visc}}$和$\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{art}}$分别为耗散项和人工黏性撞击成坑的形状与尺寸是表征撞击坑特征最主要的两个指标。目前的主流观点认为，超高速撞击过程成坑直径主要与撞击物的能量有关，简要的表达式为[31]

$$D_{\mathrm{crat}} = \left(\frac{Y}{0.952}\right)^{1/3} \tag{12}$$

其中：D_{crat}为撞击坑直径；Y是以百万吨（Mt）TNT当量为单位的小行星撞击能量。

喷溅的发生源于撞击产生的冲击波超压超过靶体材料的动态强度极限，导致材料发生损伤累积与破碎。

当冲击波在靶体表面反射时，形成拉伸波，使表层材料产生径向开裂与剥落；同时，撞击区的高温高压环境引发材料部分熔化甚至气化，进一步降低材料内聚强度，为喷溅提供有利条件。其触发判据可表示为[32]

$$P_{\text{shock}} > \sigma_{\text{dyn}} + P_{\text{g}} \tag{13}$$

其中：P_{shock}为冲击波峰值压力；σ_{dyn}为材料动态强度（与应变率相关）；P_{g}为靶体内部初始压力（小行星表面可近似为 0）。撞击过程建模框架如图17。

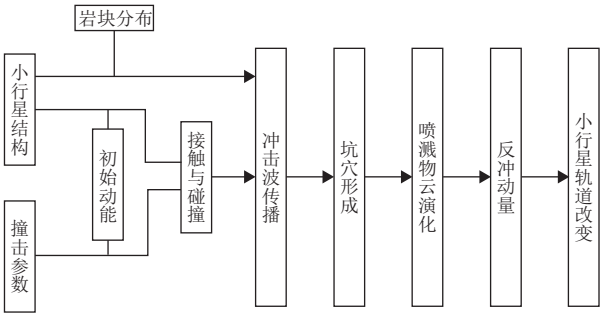


图 17　小行星撞击过程建模框架

Fig. 17　Modeling framework for asteroid impact processes

喷出物的运动遵循三维弹道方程

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_{\text{e}}}{\mathrm{d}t} = -\frac{GM}{r^3}\boldsymbol{r} + \beta_{\text{SW}}\boldsymbol{F}_{\text{rad}} + \boldsymbol{F}_{\text{drag}} \tag{14}$$

其中：M为小行星质量；β_{SW}为太阳风耦合系数，$\boldsymbol{F}_{\text{rad}}$为辐射压力；$\boldsymbol{F}_{\text{drag}}$为尘埃阻力。根据哈勃望远镜观测数据显示，DART撞击后喷出物演化分为两个阶段[32]：

1）初始相（0～8 h）：形成双锥形羽流，快速粒子逃逸系统；

2）后期相（>3 d）：受重力与辐射压作用，形成弯曲尘尾，形态与活跃小行星相似。

喷出物总质量m_{e}与撞击能量E_{k}的关系可表示为[33]

$$m_{\text{e}} = kE_k^{5/6}\rho^{1/2}Y^{-1/3} \tag{15}$$

其中：Y为材料屈服强度；k为经验系数。

基于式（9）～（15）建立的缩比动力学模型，通过几何相似性准则与无量纲参数守恒原理，将高速拦截器–小行星撞击系统等效转化为质量–速度缩小的同构体系，部分仿真结果如图18所示，绿色为SPH粒子，红色为对应粒子的轨迹。

由图18可知拦截器碰撞后小行星出现明显的位移现象，撞击区域出现喷溅现象，将速度方向与小行星表面法向相反的粒子视为喷溅SPH粒子，以撞击点为球心画球，统计在同一半径上的SPH粒子的各项参数，计算其平均速度、动能以及动量，利用式（15）计算得出其喷出物质量理论值，为系统验证动力缩比模型的可靠性，本研究在固定撞击器质量 m_i = 14.843 75 g 的条件下，开展了不同撞击速度 v_i 的数值仿真实验，并将仿真获得的喷出物质量 m_{SPH} 与理论公式预测值 m_{theory} 进行对比，见图19。理论喷出物质量由式（15）计算：仿真结果与理论值拟合情况良好，动力缩比模型可信度较高。

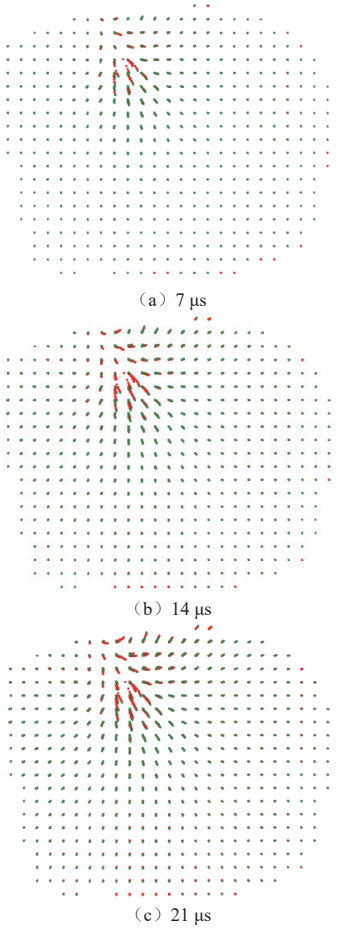


图 18　撞击后粒子轨迹图

Fig. 18　Particle path visualization after impact

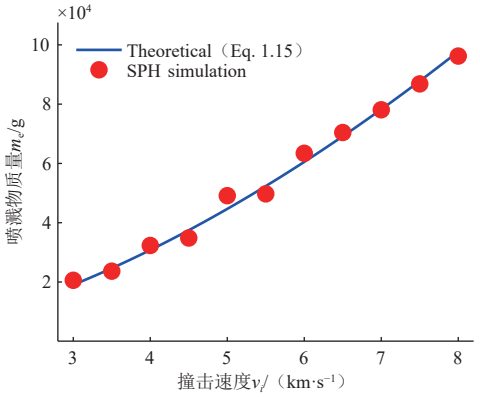


图 19　仿真结果对比[30]

Fig. 19　Comparison of simulation results[30]

基于超高速碰撞数值仿真结果，拦截器在撞击过程中发生完全塑性变形并嵌入小行星浅表层。根据开放系统动量守恒定律

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\text{asteriod}} = m_i \boldsymbol{v}_i - \int_0^t \dot{m}_e \boldsymbol{v}_e \mathrm{d}t \tag{16}$$

其中：m_i为拦截器质量，$\boldsymbol{v}_i$为撞击速度矢量，$\dot{m}_e$为喷出物质流率，$\boldsymbol{v}_e$为喷出物平均逃逸速度，计算动量影响因子可知：

$$\beta = \frac{|\Delta \boldsymbol{P}_{\text{asteroid}}|}{m_i |\boldsymbol{V}_i|} = 3.2 \pm 0.6 \tag{17}$$

由此可知动能撞击可使近地小行星产生显著轨道摄动。

3 其他类型小行星拓展分析

不同类型小行星（如金属质、冰质、碎石堆结构）的物理特性差异显著，导致动能撞击偏转效果差异明显。这些近地小行星根据表面反照率区分大致分为三种：C型、S型和M型[34-35]。球粒陨石小行星C型，可能由碳、黏土和硅酸盐岩石组成，外观较暗，是太阳系中最古老的天体之一。石质小行星S型，由硅酸盐材料和镍铁组成。金属小行星M型，主要由铁镍构成。

1）金属质小行星（M型）

主要由铁镍合金及少量硅酸盐构成，密度高，结构致密且内聚力强，近似连续均匀固体。由于高强度和低孔隙率，撞击体动能难以转化为全局动量变化，动量增强因子通常接近1（即近似完全非弹性碰撞）[36]。产生的碎片尺寸大、数量少，二次撞击风险较低。需极高动能或重复撞击才能实现轨道显著偏转，更适合核爆或重力牵引等替代方案。

2）冰质小行星（C型/彗核类）

以水冰、甲烷冰及硅酸盐尘埃为主，密度低，孔隙率高，易挥发成分多，易汽化与喷发：撞击能量易导致冰升华或剧烈汽化，产生羽状喷流，反作用力可增强动量传递。热力学效应（如相变）主导撞击过程，需耦合热–力学模型（如SPH中的状态方程），动能撞击可高效偏转轨道，但需控制碎片云扩散。

4 结 论

本研究针对近地小行星超高速碰撞防御的关键技术挑战，提出并实现了一套创新的不规则几何体高效建模与仿真方法体系，为小行星防御任务提供了理论支撑与工程实践依据。主要结论如下：

1）小行星三维建模方法

基于BVH空间加速结构与多方向射线检测算法，开发了并行化Python体素化程序，成功将复杂小行星外壳模型的内部单元识别复杂度从$O(N)$降至$O(\log N)$，建模效率提升86.8%。该方法突破了传统SPH建模对规则几何体的限制，实现了2024YR4小行星高保真体素化模型（图4）与SPH粒子模型（图5）的快速生成。

2）超高速碰撞动力学机制

通过SPH数值模拟揭示了动能撞击的动量传递规律：撞击角度θ是动量传递因子β的核心控制参数，60°撞击可实现最优效率（$\beta > 3.5$），其值随角度变化满足指数衰减关系

$$\beta(\theta) = \beta_0 \mathrm{e}^{[-k(-\theta+30^\circ)]} \quad (30^\circ > \theta)$$

临界角度撞击（$\theta > 60°$）导致切向喷出物主导，动量传递效率显著降低；近垂直撞击（$30° < \theta < 60°$）形成对称溅射锥，显著提升β值。

3）撞击防御技术设计依据

针对2024YR4类碎石堆结构小行星，动能撞击在60°倾角下可最大化轨道偏移效果。结合简化侵彻理论，为拦截器设计提供关键参数优化空间。本研究建立的“观测数据→几何重建→体素化→SPH仿真”技术链条，可推广至其他不规则天体防御场景。未来工作可进一步耦合轨道动力学模型，优化多点撞击策略，展开对其它类型小行星或其他有威胁天体的研究，从而提升对千米级威胁天体的防御能力。本研究提出的方法为小行星超高速碰撞防御的数值模拟提供了有效工具，并为行星防御系统的工程设计奠定了理论与方法基础。

参考文献

[1] IAU Minor Planet Center. The International Astronomical Union Minor Planet Center[EB/OL]. (2024-08-27) [2025-09-08]. https://www.minorplanetcenter.net/.

[2] 吴伟仁，龚自正，唐玉华，等. 近地小行星撞击风险应对战略研究[J]. 中国工程科学，2022，24(2)：140-151.
WU W R，GONG Z Z，TANG Y H，et al. Strategic research on the risk response to near-Earth asteroid impacts[J]. Strategic Study of CAE，2022，24(2)：140-151.

[3] BOTTKE W F，DAVID V，MIROSLAV B，et al. Dynamical spreading of asteroid families by the yarkovsky effect[J]. Science，2001，294(5547)：1693-1696.

[4] 刘雪奇，孙海彬，孙胜利. 近地小行星防御策略分析[J]. 深空探测学报(中英文)，2017，4(6)：557-563.
LIU X Q，SUN H B，SUN S L. Analysis of defense strategies against near-Earth asteroids[J]. Journal of Deep Space Exploration，2017，4(6)：557-563.

[5] 武立军，王旭，王建斌. 未来深空安全问题的几点思考[J]. 现代防御技术，2021，49(2)：8-12.
WU L J，WANG X，WANG J B. Considerations on future deep space

security issues[J]. Modern Defence Technology，2021，49(2)：8-12.

[6] 陆红亚，王倩，陈悦，等. 美太空军事战略发展分析及对空间安全的影响研究[J]. 现代防御技术，2023，51(3)：31-38.
LU H YA，WANG Q，CHEN Y，et al. Analysis of U. S. space military strategy development and its impact on space security[J]. Modern Defence Technology，2023，51(3)：31-38.

[7] 任远桢，金胜，鲁耀兵，等. 美国国防太空体系架构发展浅析[J]. 现代防御技术，2023，51(6)：9-17.
REN Y Z，JIN S，LU Y B，et al. Analysis of the development of U. S. national defense space architecture[J]. Modern Defence Technology，2023，51(6)：9-17.

[8] NASA. Double Asteroid Redirection Test (DART) mission [EB/OL]. (2022-04-07) [2025-09-08]. Available：https：//www.nasa.gov/planetary-defense/dart.

[9] MICHEL P，KUEPPERS M，SIERKS H，et al. European component of the AIDA mission to a binary asteroid：characterization and interpretation of the impact of the DART mission[J]. Advances in Space Research，2018，62(8)：2261-2272.

[10] CHENG C，MICHEL P，ULAMEC S. Asteroid Impact & Deflection Assessment (AIDA) Mission[EB/OL]. (2019-02-23)[2025-09-08]. http：//www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Safety_Security/Hera/Asteroid_Impact_Deflection_Assessment_mission.

[11] CHANG H C. NEOTωIST Mission[EB/OL]. (2019-02-23)[2025-09-08]. http：//www.neoshield.eu/science-technology-asteroid-impact/neo-angular-momentum-spin/.

[12] DRUBE L，HARRIS A W，ENGEL K，et al. The NEOTωIST mission (Near-Earth Object Transfer of angular momentum spin test)[J]. Acta Astronautica，2016，127：103-111.

[13] 央广网. 我国正规划撞击一颗小行星 验证防御方案[EB/OL]. (2025-07-10)[2025-09-08]. https：//news.cnr.cn/kuaixun/20250907/t20250907_527353133.shtml.

[14] BENZ W，ASPHAUG E，RYAN E V. Numerical simulations of catastrophic disruption：recent results[J]. Planetary and Space Science，1994，42(12)：1053-1066.

[15] BENZ W，ASPHAUG E. Explicit 3D continuum fracture modeling with smooth particle hydrodynamics[C]//Lunar and Planetary Science Conference. USA:[s.n.], 1993.

[16] 焦艺菲，程彬，陈诗雨，等. 小天体防御高速撞击数值仿真研究[J]. 中国科学：技术科学，2023，53(12)：2039-2052.
JIAO Y F，CHENG B，CHEN S Y，et al. Numerical simulation study on high-speed impact for small celestial body defense[J]. Science China Technological Sciences，2023，53(12)：2039-2052.

[17] ZHOU Q，XU W J，DONG X Y. SPH-DEM coupling method based on GPU and its application to the landslide tsunami. Part I：method and validation[J]. Acta Geotechnica，2022，17(6)：2259-2276.

[18] 王玉恒，宋瑞，陈凌辉，等. 国际近地行星防御安全研究动态及思考[J]. 空间碎片研究，2018，18(4)：1-10.
WANG Y H，SONG R，CHEN L H，et al. International research trends and reflections on planetary defense security[J]. Space Debris Research，2018，18(4)：1-10.

[19] 范文宝，杜菲，王兆魁. 金属质小行星在轨处置技术综述[C]//第三届中国空天安全会议. 北京：中国宇航学会，2021.
FAN W B，DU F，WANG Z K. Review of in-orbit disposal technologies for metallic asteroids [C]//Proceedings of the 3rd China Aerospace Security Conference. Beijing：Chinese Society of Astronautics，2021.

[20] 韩竞一. 近地小行星防御的国际法问题研究[D]. 沈阳：辽宁大学，2023.
HAN J Y. Research on international legal issues of near-Earth asteroid defense[D]. Shenyang：Liaoning University，2023.

[21] 张熇，顾征，韩承志. 小行星撞击防御任务分析与设计[J]. 深空探测学报(中英文)，2023，10(4)：387-396.
ZHANG H，GU Z，HAN C Z. Analysis and design of asteroid impact defense missions[J]. Journal of Deep Space Exploration，2023，10(4)：387-396.

[22] 党雷宁，白智勇，石义雷，等. 小行星撞击地球危害评估研究进展[J]. 力学进展，2024，54(3)：563-605.
DANG L N，BAI Z Y，SHI Y L，et al. Advances in hazard assessment of asteroid impacts on Earth[J]. Advances in Mechanics，2024，54(3)：563-605.

[23] 柳森，党雷宁，赵君尧，等. 小行星撞击地球的超高速问题[J]. 力学学报，2018，50(6)：1311-1327.
LIU S，DANG L N，ZHAO J Y，et al. Hypervelocity issues in asteroid impacts on Earth[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2018，50(6)：1311-1327.

[24] POPOVA O P，JENNISKENS P，EMEL'YANENKO V，et al. Chelyabinsk airburst，damage assessment，meteorite recovery，and characterization[J]. Science，2013，342(6162)：1069-1073.

[25] VASILYEV N V. The Tunguska meteorite problem today[J]. Planetary and Space Science，1998，46(2)：129-150.

[26] JOHNSON G R，COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains，high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague，Netherlands: [s.n.], 1985：541-547.

[27] 张帅，钱霓婧. 基于LS-DYNA的航天器超高速撞击小行星分析[C]//北京力学会第三十一届学术年会. 2025-03-23.
ZHANG S，QIAN Y J. Analysis of hypervelocity impact of spacecraft on asteroids based on LS-DYNA[C]//The 31st Annual Conference of Beijing Society of Mechanics. Beijing: [s.n.], 2025.

[28] NASA. Eyes on asteroids：2024 YR4 trajectory data[EB/OL]. (2024-02-01) [2025-05-20]. https：//eyes.nasa.gov/apps/asteroids/#/2024_yr4.

[29] 龚自正，宋光明，陈川，等. 我国应对近地小行星撞击风险和动能撞击偏转研究的若干进展[J]. 上海航天(中英文)，2024，41(5)：11-23.
GONG Z Z，SONG G M，CHEN C，et al. Some progress in China's research on mitigating the risk of near-Earth asteroid impacts and kinetic impact deflection[J]. Shanghai Aerospace，2024，41(5)：11-23.

[30] RADUCAN S D，DAVISON T M，COLLINS G S. Physical properties of asteroid Dimorphos derived from the DART impact[J]. Nature Astronomy，2024，8：321-335.

[31] HILL J G，GODA M P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere[J]. Astronomical Journal，1993，105(3)：1114-1144.

[32] 张鸿宇，迟润强，孙淼，等. 砾石堆结构超高速撞击溅射物特性[J]. 深空探测学报(中英文)，2023，10(4)：428-435.
Zhang Hongyu，Chi Runqiang，Sun Miao，et al. Characteristics of ejecta from hypervelocity impacts on gravel-mound structures[J]. Journal of Deep Space Exploration，2023，10(4)：428-435.

[33] CHENG A F，et al. Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos[J]. Nature，2023，616：457-460.

[34] RADUCAN S D，DAVSION T M，COLLINS G S. Ejecta distribution and momentum transfer from oblique impacts on asteroid surfaces[J]. Icarus，2022，374：114793.

[35] TEDESCO E F，THOLEN D J，ZELLNER B. The eight-color asteroid survey：Standard stars[J]. Astronomical Journal，1982，87(11)：1585-1592.

[36] HOUSEN K R，HOLSAPPLE K A. Ejecta from impact craters[J]. Icarus，2011，211(1)：856-875.

作者简介：

李兴汉(2004–)，男，研究生，主要研究方向：计算爆炸力学。

通信地址：湖南省长沙市开福区福元路一号1-1-5(410073)

E-mail：lixinghan22@nudt.edu.cn

张舵(1977–)，男，国防科技大学理学院，教授，博导，主要研究方向：爆炸力学和毁伤快速算法研究。**本文通信作者**。

通信地址：湖南省长沙市开福区福元路一号1-1-5(410073)

E-mail：zhangduo@nudt.edu.cn

Asteroid Modeling Technology and Hypervelocity Collisions

LI Xinghan，ZHANG Duo，YANG Feihong，WANG Xinyu，RAN Xianwen

（National University of Defense Technology，Changsha 410073，China）

Abstract：To address the challenges of complex asteroid geometries, low modeling efficiency, and unclear momentum transfer mechanisms during hypervelocity collisions, a voxelization modeling method accelerated by a Bounding Volume Hierarchy (BVH) structure was developed. Key momentum transfer laws under hypervelocity impact were computationally analyzed using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. The results demonstrated that compared to GPU-based voxelization methods, the present approach achieved an 86.8% efficiency gain in voxelization processing, with an voxel identification accuracy of 96.5% and particle mass errors below 3.5%. A strong correlation existed between impact angle and momentum transfer factor (β), peaking at β = 3.82 for a 60° impact—representing a 41.7% increase over the 30° impact case. Ejecta-induced recoil contributed 68.3% of the total momentum change imparted to the asteroid. This study confirms that the BVH-accelerated voxelization method efficiently handles concave geometries (7.3 times faster than conventional methods) and identifies 60° as the optimal impact angle for maximizing momentum transfer efficiency in rubble-pile asteroids (β > 3.5). The established technical framework is scalable to kilometer-scale celestial body deflection scenarios, providing critical tool support for optimizing multi-impactor collaborative trajectories.

Keywords：asteroid defense；voxelization modeling；momentum transfer factor；hypervelocity impact；orbital deflection

Highlights：

- Propose a BVH-accelerated voxelization method, improving modeling efficiency by 86.8%.
- Identify 60° as the optimal impact angle for rubble-pile asteroids, maximizing momentum transfer (β > 3.5).
- Quantify ejecta contribution to momentum change at 68.3% via SPH simulations.
- Establish a scalable computational framework for kilometer-scale celestial body deflection.

[责任编辑：高莎，英文审校：宋利辉]