

# 小行星防御动能撞击效果评估

张韵, 刘岩, 李俊峰

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘要:** 以动能撞击防御潜在威胁小行星概念为背景, 采用物质点法 (Material Point Method, MPM) 模拟了铝弹高速撞击S型小行星的过程, 将撞击结果导入引力N体-离散元动力学模型中, 对其后续演化过程进行仿真, 并分析了撞击后碎片对地球的威胁指数。结果显示小行星在高速撞击的作用下部分破碎, 大量碎片以与撞击方向相反的速度向外喷射, 从而提升了小行星的撞击偏移效果。研究采用了两种不同结构的小行星模型: 完整结构 (monolithic structure) 的小行星在遭受撞击后会喷射出比原小行星小得多的碎片, 而碎石堆结构 (rubble-pile structure) 的小行星在撞击作用下可分裂成大小和速度分布较为均匀的碎片。威胁指数的分析表明动能撞击方式确实有效减小了小行星的威胁程度, 撞击后的最大剩余碎片可被成功偏移至安全轨道, 但仍有部分碎片会与地球相撞。与完整结构相比, 针对碎石堆结构小行星的撞击防御的总体效果更好, 次生灾害主要为大质量碎片的撞击。研究方法可用于未来开展防御小行星的动能撞击任务的撞击条件选择和撞击结果预估。

**关键词:** 小行星防御; 高速撞击; 物质点法; 引力N体方法

**中图分类号:** V419.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2017)01-0051-07

**DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.01.008

**引用格式:** 张韵, 刘岩, 李俊峰. 小行星防御动能撞击效果评估[J]. 深空探测学报, 2017, 4(1): 51-57.

**Reference format:** Zhang Y, Liu Y, Li J F. Evaluation of effects of kinetic impact deflection on hazardous asteroids [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(1): 51-57.

## 0 引言

太阳系中的小行星多数运行于火星与木星轨道间的小行星主带。由于受到大行星引力摄动的影响, 部分小行星迁移到距地球较近的轨道, 被称为近地小行星 (Near-Earth Asteroids, NEAs)。NEAs容易受地球引力摄动而频繁改变轨道, 甚至撞击地球。其中, 日心轨道与地球轨道的最近距离在0.05 AU以内, 并且直径大于140 m (足以穿透大气层, 并造成较大伤害) 的NEAs被认为是撞击地球的潜在威胁小行星 (Potentially Hazardous Asteroids, PHAs)<sup>[1]</sup>。

近40年来, 各国科学家积极开展NEAs和PHAs的搜寻计划, 如Spacewatch<sup>[2]</sup>、卡特林那巡天系统 (Catalina Sky Survey)<sup>[3]</sup>、林肯近地小天体研究 (Lincoln Near-Earth Object Research, LINEAR)<sup>[4]</sup>等。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 还在2009年末发射了NEOWISE红外探测飞船<sup>[5]</sup>。目前, 已发现了1 700多颗潜在威胁小行星。例如, 2004年发现的直径370 m的小行星Apophis, 2008年时估计其将在2029年4月13日与地球相距大约仅

6个地球半径, 地球引力将在此次遭遇中对其轨道产生重大且难以预测的改变, 预计约有1/45 000的概率在2036年4月撞击地球<sup>[6]</sup>。在最近的观测中, Apophis的撞击概率有所下降, 它很有可能仅与地球擦肩而过, 不会带来灾难性的撞击事件。

即使Apophis不会撞击地球, 防御小行星重大陨击仍是人类终将面对的挑战。对于小行星的防御, 目前相关研究人员已提出了多种解决思路和方法, 如引力拖车、质量驱动、聚焦太阳能、Yarkovsky效应、小推力推进、激光烧蚀、核爆拦截、动能撞击等<sup>[7]</sup>。这些方法大致可以分为以下两种: 偏移小行星轨道和摧毁或部分摧毁小行星。Rogers等<sup>[8]</sup>定性分析了聚焦太阳能、电推进、化学推进 (多次脉冲)、核推进、激光烧蚀、核爆和动能撞击等方法的效率, 认为核爆是应对大尺寸天体或快速响应问题最有希望的方法, 动能撞击则居其次。Sanchez等<sup>[9]</sup>对引力拖车、质量驱动、聚焦太阳能、小推力推进、核爆和动能撞击等方法进行近似建模, 通过多目标优化法对其偏离距离、初始质量、任务时间、技术成熟度4个方面的指标进行比较, 得出聚焦太阳能和核爆拦截的前三项指标较有优势,

收稿日期: 2017-01-23 修回日期: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11572166)

但核爆的技术成熟度要高,动能撞击和小推力在偏移小质量天体轨道方面性能相当,而前者更适合时间紧迫的任务,质量驱动的效果稍差,技术也更不成熟。综上所述,核爆的效率最高,但在太空中用核武器无技术经验可鉴,并且核爆被外太空国际公约所禁止,近地轨道上使用核武器对人类也相当危险;而动能撞击的技术成熟度最高,并且太空中的动能撞击方式在NASA2005年7月的深空撞击任务(Deep Impact Mission)中也得到了验证,相比之下较为切实可行。

动能撞击方法防御小行星的最大风险是可能导致小行星分裂成仍有甚至更具威胁的多块小天体,引发更大的次生灾害。目前认为,部分小行星是由岩石或金属组成的完整结构体(monolithic structure),而多数则是在引力作用下聚集在一起的碎石堆结构体(rubble-pile structure)<sup>[10]</sup>。高速撞击模拟和实验研究表明小行星的内部结构对撞击结果有着至关重要的影响<sup>[11-15]</sup>。由此导致的撞击生成碎片大小和速度分布的不同将间接影响到动能撞击防御的效果。本文将根据碎石堆结构小行星和完整结构小行星的结构特征分别建模,采用物质点法研究其在撞击作用下的动力学响应特性,再通过引力N体(N-body)-离散元动力学模型模拟撞击形成的碎片在太阳系高精度模型中的轨道演化情况。重点关注撞击后碎片的分布情况及其对地球威胁程度的变化,为威胁天体的预测和规避提供有效参考。

## 1 数值模拟方法与参数设置

本文对动能撞击防御小行星的全过程进行了模拟。该过程主要分为两个阶段:高速撞击破碎阶段和引力演化阶段。鉴于动能撞击器与小行星的相对撞击速度可达数千米每秒的量级,第一阶段主要涉及超高速撞击过程。在此阶段,小行星结构会产生强烈的塑性变形以及断裂破碎。由于冲击载荷幅值远大于小行星自身的引力,本阶段可忽略小行星的组成材料间的相互引力作用。第二阶段则主要考虑撞击生成的碎片相互间的引力和接触作用,推演它们在绕日轨道的运动情况。由于此阶段中碎片的相互接触作用主要为在引力聚合作用下的低速碰撞,可忽略材料的塑性变形,仅需考虑弹性接触。本节对研究所采用的这两种数值模拟方法进行介绍。

### 1.1 高速撞击破碎阶段

本研究采用冲击爆炸三维物质点法(Material Point Method, MPM)数值仿真软件MPM3D对撞击破碎阶段进行模拟<sup>[16]</sup>。物质点法是一种无网格粒子类方法,其采用拉格朗日质点和欧拉网格双重描述,充分结合了二者的优点,避免了欧拉法在界面跟踪和非线

性对流项处理方面的困难以及拉格朗日法因网格畸变而产生的数值困难,在处理冲击、爆炸、流固耦合等涉及大变形和材料破碎的问题时具有明显的优势。MPM3D已成功应用于模拟超高速碰撞下材料与结构的力学行为<sup>[17-18]</sup>。与目前常用于模拟小行星结构冲击动力学行为的光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)方法<sup>[11-13]</sup>相比,物质点法能够更为高效准确地模拟高速撞击过程,并较为准确地复现撞击后的碎片分布<sup>[19-20]</sup>。

考虑到近地小行星中大多数为S型小行星,小行星材料模型采用Holmquist-Johnson-Cook模型<sup>[21]</sup>。该模型中考虑了孔洞坍塌的影响,可模拟脆性岩石材料在大变形、高应变率和高压下的行为。撞击器模型采用Al6061材料,其力学行为用Johnson-Cook强度模型和Mie-Grüneisen状态方程描述<sup>[19]</sup>。由于冲击载荷的短历时特征,此阶段总历时一般不超过1 s<sup>[12]</sup>。为准确获取小行星遭受撞击后的碎片分布,本研究中该阶段物理过程总历时为3 s。

### 1.2 引力作用下的演化阶段

引力N体问题是天体力学的经典问题。对于N大于2的相互引力作用系统,无法通过解析的方法进行求解,对于该系统的研究必须依靠数值积分方法。同时,为了考虑碎片之间的低速碰撞和引力再聚合过程的接触作用,我们将N体模型与离散元方法中的软球动力学模型(Soft-Sphere Discrete Element Method, SSDEM)相结合,开发了并行N-body/SSDEM代码对撞击后碎片的引力演化阶段进行模拟<sup>[22]</sup>。碎片间的弹性接触采用线弹性-阻尼模型描述<sup>[22]</sup>。由于撞击后构成单块碎片的未完全损坏粒子之间仍可承受一定的拉伸强度,模型中以线弹性粘附力的形式对此进行处理。除了太阳引力作用外,模型中还考虑了八大行星和月球的引力作用对碎片于绕日轨道演化的影响。

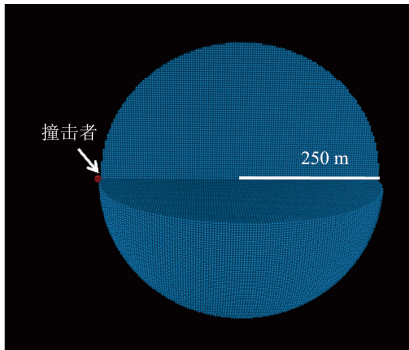
### 1.3 两个阶段的物理量转换

撞击破碎阶段结束后,可统计出所生成碎片的质量、密度、位置和运动情况,并将其作为引力演化阶段的初值。为保证计算精度,撞击破碎阶段的模型粒子数高达 $10^6$ 量级,而引力演化阶段中的计算量会随着N的增大而指数增长。为了减小计算量,在转换过程中还采用了合并算法,将非损伤区域的颗粒进行合并(详见3.1节)。此外,在模拟过程中,当一个相对稳定的颗粒聚合物形成时,通过动量守恒定律将该颗粒体系合并成一个单独颗粒,进一步减少计算量。

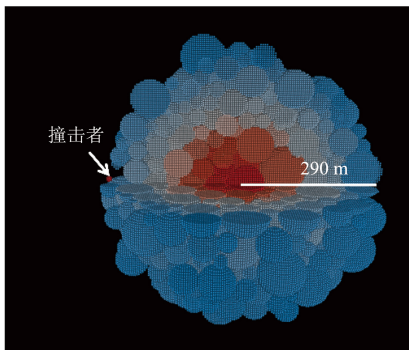
## 2 小行星模型及防御问题的参数设置

考虑到实际PHAs的半径分布以及动能撞击防御方

法的能力范围, 本研究以百米量级的小行星作为防御目标, 此量级小行星的撞击当量约为 $10^4$  (MT)<sup>[23]</sup>, 相当于二战末期于广岛投掷的原子弹当量的 $10^6$ 倍。所模拟小行星质量设为 $1.598 5 \times 10^{11}$  kg, 密度为 $2.44 \text{ g/cm}^3$ 。撞击器的直径设为 $10 \text{ m}$ , 密度为 $2.77 \text{ g/cm}^3$ 。小行星和撞击器的形状均假设为球形。为保证数值解的收敛性和准确性, 在撞击分裂阶段分别采用约 $10^6$ 和 $10^2$ 个粒子模拟小行星和撞击器。



(a) 完整结构小行星



(b) 碎石堆结构小行星 (其中颜色表示该石块与小行星中心的距离)

图 1 两种不同内部结构小行星与撞击器初值构型

Fig. 1 Initial configuration of impact geometry for two different internal structures

图 1 中给出了撞击前的小行星结构 1/4 剖面图。碎石堆结构由随机分布的石块在引力作用下聚合形成。其中最大石块直径为 $50 \text{ m}$ , 最小石块直径为 $12 \text{ m}$ 。由于碎石堆结构内部存在高达约 $40\%$ 的空隙, 为保持与完整结构材料密度和总体质量的一致, 碎石堆结构小行星的整体半径要大一些。除初始模型外, 模拟中的其他设置对于两种结构均相同。

模拟所假设 PHA 的轨道根数如表 1 所示。该小行星与地心最近距离可达约 $5\ 000 \text{ km}$ , 对地球构成撞击威胁。撞击防御提前时间设为 $10$ 年, 则相应的防御速度改变量的最低要求约为 $1 \text{ cm/s}$ 。因此, 为了达到防御要求, 撞击器的速度设为 $2 \text{ km/s}$ 。为达到最大偏移的效果, 撞击方向选为沿着小行星轨道速度方向反向撞击。

表 1 PHA 轨道根数

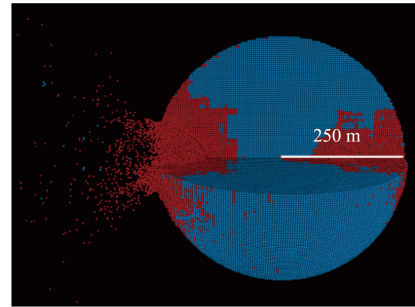
Table 1 Orbital elements of the hypothetical PHA

$a/\text{AU}$	$e$	$i/(\text{°})$	$\Omega/(\text{°})$	$\omega/(\text{°})$
1.726	0.571	1.218	253.964	73.162

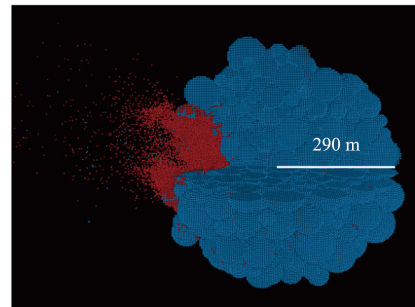
### 3 数值模拟结果

#### 3.1 高速撞击破碎阶段

图 2 中展示了撞击后小行星的结构特征和材料失效区域。结果显示小行星在高速撞击的作用下部分破碎, 大量碎片以与撞击方向相反的速度向外喷射, 从而有可能提升小行星的撞击偏移效果。此外, 由于反射波的影响, 完整结构的小行星在相对撞击地点的背面还产生了大量裂纹和失效区域。而碎石堆结构的小行星能够通过内部的孔隙结构分散撞击产生的应力波的能量, 使得应力波在传播过程中快速衰减, 从而将结构损伤控制在撞击区域附近。



(a) 完整结构小行星



(b) 碎石堆结构小行星

图 2 两种不同内部结构小行星遭受高速撞击结果 (其中红色粒子表示完全损伤区域)

Fig. 2 Last instant of the fragmentation phase after impact (red is fully damaged part) for two different internal structures

将物质点法得到的撞击后碎片的物理参数和运动情况转换到引力 N 体模型中继续推进其演化过程。在引力演化阶段, 由于计算量随着  $N$  的增大呈指数增加的趋势, 为减小计算量而又不损失精度, 在将物质点法输出数据导入到引力 N 体模型的时候利用物质点法的背景网格对网格内的粒子进行合并, 可将计算量减小至 $10^5$ 数量级。同时, 考虑到撞击后存在大块的未分

裂碎片,模型粒子可以在这些大块碎片中继续合并。通过分层树结构对撞击结束场景中的粒子进行统计,如果某一区域所包含的所有粒子属于同一石块且均未完全损伤,则将这些粒子按动量守恒定律合并成一个质量、密度相当的颗粒。由此,计算量可进一步减小至 $10^4$ 数量级。图3是合并后的两个模型示意图。所示模型即为引力演化阶段的初值场景。

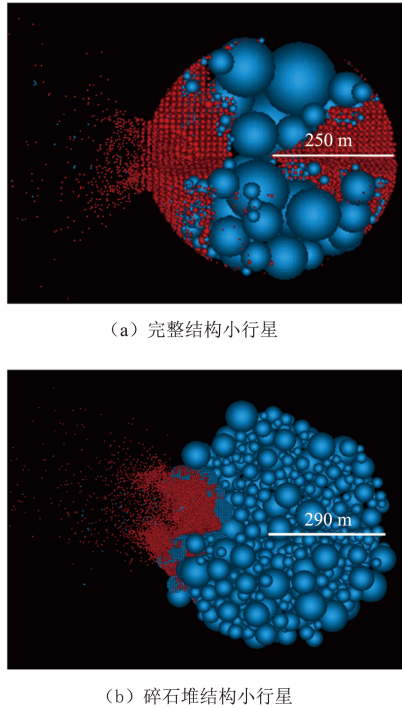


图3 两种不同内部结构小行星于引力演化阶段的初始设置(其中红色粒子表示完全损伤区域)

Fig. 3 First instant at the beginning of the gravitational phase which is converted from the output of fragmentation phase impact (red is fully damaged part) for two different internal structures

## 3.2 引力作用下的演化阶段

本文对撞击后产生碎片在各自绕日轨道和相互引力作用下的长期演化情况进行了模拟。为确保对碎片分布情况评估的准确性,整体物理演化时间超过1年。本节根据小行星撞击常用的评价指标,介绍动能撞击防御PHA全过程仿真的结果。

### 3.2.1 最大剩余碎片

最大剩余碎片是指在撞击演化阶段完成后,通过引力再聚集过程形成的最大碎片,这通常是由大量碎石组成的聚合物,通过分析其速度改变量可对偏移程度进行评估。表2给出了本文所用算例中最大剩余碎片的信息,其中 $M_{lr}$ 表示最大剩余碎片质量, $M_{target}$ 表示目标小行星的质量, $\Delta v_t$ 、 $\Delta v_n$ 、 $\Delta v_h$ 分别表示沿轨道速度方向、垂直轨道速度方向和轨道法线方向的速度增量。可以看出,最大剩余碎片的速度改变量已超过

防御要求,采用动能撞击防御方法能够较好地规避PHA的大部分质量。其中,由于自身的离散结构特性,碎石堆结构的逃逸碎片质量要比完整结构的大,而逃逸碎片所带来的动量增量使得最大剩余碎片的偏移效果也得到了提升。

表2 最大剩余碎片质量和速度增量

Table 2 Summary of the largest remnant's mass and velocity increment

结构模型	$M_{lr}/M_{target}$	$[\Delta v_t \Delta v_n \Delta v_h] / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
完整结构	0.905	$[-0.090 -0.003 -0.003]$
碎石堆结构	0.853	$[-0.127 -0.003 -0.012]$

### 3.2.2 碎片大小速度分布特性

图4给出了撞击后碎片累计大小分布曲线。坐标横轴表示碎片的等效直径,纵轴表示直径大于给定数值的碎片个数。可看出撞击后的逃逸碎片的大小跨度较大,仍有数量可观的、能对地球造成撞击伤害的碎片(直径大于10 m)存在。其中完整结构的小行星在遭受撞击后会喷射出比原小行星小得多的碎片材料,而碎石堆小行星在撞击作用下可分裂成大小分布较为均匀的碎片。后者的碎片大小分布主要取决于原碎石堆结构的碎片构型分布。

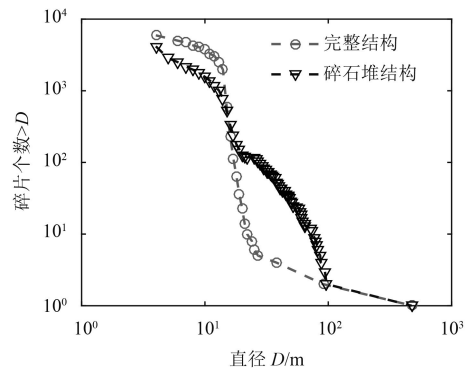


图4 两种结构的小行星撞击产生的碎片大小累计个数分布(由于受到颗粒合并算法的影响,直径小于5 m的碎片大小分布并不能反映真实情况)

Fig. 4 Cumulative diameter distribution in log-log plots for the fragments of the monolithic target and the rubble-pile target (due to the merge algorithm, the number of small fragment, i.e.  $D < 5 \text{ m}$ , is not accurate)

图5展现了撞击后碎片的累计速度改变量大小分布曲线(速度绝对值为相对于原PHA轨道的相对速度大小)。坐标横轴表示碎片从撞击中获得的速度改变量大小,纵轴表示速度改变量大小大于对应值的累计碎片质量百分比。碎石堆结构遭遇撞击后能产生速度分布更为集中的碎片。从图5中可看出在速度改变量大小上,所有碎片均达到了防御要求。但需要注意的是,在不同的速度改变方向上,即使速度改变量大小相同,所得到的轨道偏移的效果仍有很大差别,需对生成碎片的轨道分布进行统计分析。

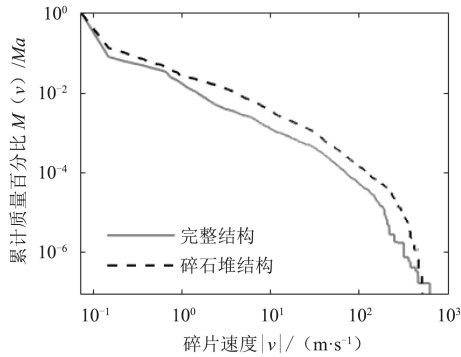


图 5 完整结构和碎石堆结构小行星撞击产生碎片速度累计质量分布  
Fig. 5 Cumulative normalized mass versus ejection speed distribution for the fragments of the monolithic target and the rubble-pile target

### 3.2.3 碎片轨道分布特性

为了评估撞击中碎片轨道转移的效果, 图 6 和图 7 分别给出了两种结构撞击后碎片的轨道分布情况。碎石堆结构遭遇撞击生成的碎片的轨道分布较为分散。可看出撞击后仍有大量碎片滞留在原轨道区域附近。这些碎片对地球的撞击威胁不能排除。

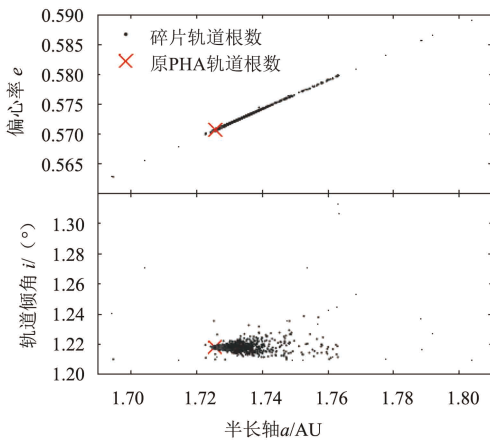


图 6 完整结构的小行星撞击产生的碎片轨道根数分布  
Fig. 6 Distribution of orbital elements for the monolithic case

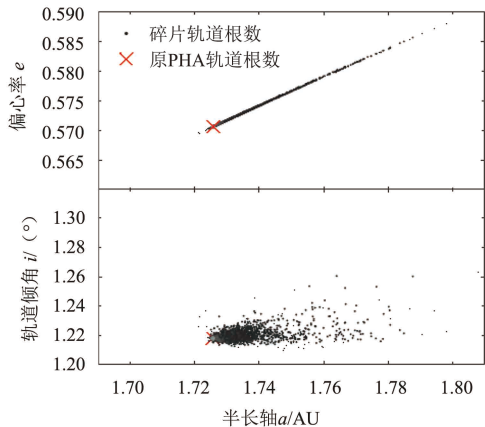


图 7 碎石堆结构小行星撞击产生碎片轨道根数分布  
Fig. 7 Distribution of orbital elements for the rubble-pile case

### 3.3 碎片危害评估

从以上的分析中可看出仍有较大碎片位于与地球撞击轨道交会的原轨道附近, 为量化最终威胁碎片的个数, 通过二体轨道方程对所有碎片的轨道进行外推 10 年 (即在原预估撞击时间附近进行检测), 检测其是否与地球表面存在交点。表 3 给出了威胁碎片的统计信息。可看出由于大块的碎片在动能撞击过程中均转移至安全轨道, 最终发生撞击的碎片质量较小, 仅发生空爆事件, 不会对地面造成显著伤害。根据 Collins 等<sup>[24]</sup>提出的方法, 对威胁碎片的累计空爆能量进行了评估, 发现对于完整结构的小行星总预期撞击能量约为 6.07 MT, 而对于碎石堆结构的小行星总预期撞击能量约为 4.32 MT。

表 3 威胁碎片估计值

Table 3 Estimated values of the damage			
碎片直径 /m	空爆能量当量 /MT	完整结构威胁碎片个数	碎石堆结构威胁碎片个数
<20	0~0.2	93 (直径 4.95~19.0 m)	22 (直径 6.1~16.5 m)
		1 (直径 20.2 m)	2 (直径 20.3 m 和 39.0 m)

综上, 动能撞击方法能够有效规避撞击后的最大剩余碎片和大多数碎片 (尤其是质量较大的碎片), 但仍有部分较小碎片会与地球发生撞击。

## 4 结论

作为可靠性和成熟度较高的小行星防御策略, 动能撞击方法将会产生一定量的威胁碎片。本文通过数值仿真实验, 针对两种结构的小行星, 分析遭遇脉冲偏离后的小行星及其碎片的轨道演化情况, 从而得到小行星逃逸碎片的分布情况, 并评估最大剩余碎片和逃逸碎片对地球的威胁。结果显示小行星很容易在撞击的作用下破碎分解, 并产生数量和质量均较为可观的逃逸碎片。对威胁指数的分析表明动能撞击方式确实有效减小了小行星的威胁程度。最大剩余碎片能够通过针对相应提前防御时间选择合适的撞击条件来成功规避, 但部分逃逸碎片则会对地球造成撞击伤害。与完整结构相比, 针对碎石堆结构小行星的撞击防御的总体效果更好, 次生灾害主要为大质量碎片 (取决于原碎石堆结构的碎片构型分布) 的撞击。本研究建立了小行星高速撞击演化全过程仿真方法, 并揭示了小行星结构对动能撞击防御效果的影响, 有助于未来开展防御小行星的动能撞击任务设计。

## 参 考 文 献

- [1] Perna D, Barucci M A, Fulchignoni M. The near-Earth objects and their potential threat to our planet [J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2013, 21(1): 1-28.
- [2] Carusi A, Gehrels T, Helin E F, et al. Near-Earth objects: present search programs [M]. Gehrels T. *Hazards Due to Comets and Asteroids*. Tucson: Univ. of Arizona, 1994: 127-147.
- [3] Larson S, Spahr T, Brownlee J, et al. The Catalina sky survey and southern hemisphere NEO survey [C]// *Proceedings of the 1999 AMOS Technical Conference*. kihei, HI: [s. n.], 1999: 182-186.
- [4] Stokes G H, Evans J B, Vigghe E M, et al. Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR) [J]. *Icarus*, 2000, 148: 21-28.
- [5] Mainzer A, Grav T, Bauer J, et al. NEOWISE observations of near-Earth objects: preliminary results [J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 743(2): 156-172.
- [6] Giorgini J D, Benner L A, Ostro S J, et al. Predicting the Earth encounters of (99942) Apophis [J]. *Icarus*, 2008, 193(1): 1-19.
- [7] 马鹏斌, 宝音贺西. 近地小行星威胁与防御研究现状[J]. *深空探测学报*, 2016, 3(1): 10-17.
- Ma P B, Baoyin H X. Research status of the near-Earth asteroids's hazard and mitigation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(1): 10-17.
- [8] Rogers G, Izenberg N. Comparison of the efficiency of various asteroid hazard mitigation techniques [R]. Vail, Colorado: NASA NEO Workshop, 2006: 26-28.
- [9] Sanchez P, Colombo C, Vasile M, et al. Multicriteria comparison among several mitigation strategies for dangerous near-Earth objects [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(1): 121-142.
- [10] Richardson D C, Leinhardt Z M, Melosh H J, et al. Gravitational aggregates: evidence and evolution [M]. Bottke Jr W F, Cellino A, Paolicchi P, et al. *Asteroids III*. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 2002: 501-515.
- [11] Benavidez P G, Durda D D, Enke B L, et al. A comparison between rubble-pile and monolithic targets in impact simulations: application to asteroid satellites and family size distributions [J]. *Icarus*, 2012, 219(1): 57-76.
- [12] Asphaug E, Ostro S J, Hudson R S, et al. Disruption of kilometre-sized asteroids by energetic collisions [J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 437-440.
- [13] Michel P, Benz W, Richardson D C. Disruption of fragmented parent bodies as the origin of asteroid families [J]. *Nature*, 2003, 421(6923): 608-611.
- [14] Flynn G J, Durda D D, Patmore E B, et al. Hypervelocity cratering and disruption of porous pumice targets: Implications for crater production, catastrophic disruption, and momentum transfer on porous asteroids [J]. *Planetary and Space Science*, 2015, 107: 64-76.
- [15] Okamoto T, Nakamura A M, Hasegawa S. Impact experiments on highly porous targets: cavity morphology and disruption thresholds in the strength regime [J]. *Planetary and Space Science*, 2015, 107: 36-44.
- [16] 张雄, 廉艳平, 刘岩, 等. 物质点法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [17] Liu P, Liu Y, Zhang X, et al. Investigation on high-velocity impact of micron particles using material point method [J]. *Beijing: International Journal of Impact Engineering*, 2015, 75: 241-254.
- [18] Liu P, Liu Y, Zhang X. Simulation of hyper-velocity impact on double honeycomb sandwich panel and its staggered improvement with internal-structure model[J]. *International journal of mechanics and materials in design*, 2016, 12(2): 241-254.
- [19] Ma S, Zhang X, Qiu X M. Comparison study of MPM and SPH in modeling hypervelocity impact problems [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36: 272-282.
- [20] Huang P, Zhang X, Ma S, et al. Shared memory OpenMP parallelization of explicit MPM and its application to hypervelocity impact [J]. *CMES: Computer Modelling in Engineering & Sciences*, 38(2): 119-148, 2008.
- [21] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [C]// *The 14th International Symposium on Ballistics*. Quebec, Canada: [s. n.], 1993.
- [22] Zhang Y, Baoyin H, Li J, et al. Effects of orbital ellipticity on collisional disruptions of rubble-pile asteroids [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2015, 360(1): 1-16.
- [23] Chapman C R. The hazard of near-Earth asteroid impacts on Earth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(1): 1-15.
- [24] Collins G S, Melosh H J, Marcus R A. Earth impact effects program: a web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2005, 40(6): 817-840.

作者简介:

李俊峰(1964-), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 航天动力学与控制。

通信地址: 北京清华大学蒙民伟科技大楼N909(100084)

电话: (010)62797719

E-mail: lijunf@mail.tsinghua.edu.cn

## Evaluation of Effects of Kinetic Impact Deflection on Hazardous Asteroids

ZHANG Yun, LIU Yan, LI Junfeng

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

**Abstract:** The kinetic impact deflection would result in a number of unexpected hazardous fragments. For this reason, understanding the outcomes of impact is fundamental to assess the effects of this mitigation technique. The process of hyper-velocity impact of a small artificial aluminum projectile on an S-type asteroid is investigated with the material point method (MPM). In order to evaluate the impact threat of the resulting fragments posed to the Earth, the impact outcomes are transferred to the heliocentric orbit of a hazardous asteroid. A parallel N-body code is applied to propagate the evolution of these fragments in the solar system. The impact hazard of the fragments on the Earth is analyzed and the role of asteroid interior structures is explored. The results show that the structure of the simulated body is partially destroyed by the kinetic impactor. Some of the resulting fragments move backward along the impact direction, enhancing the deflection efficiency. Furthermore, the collision outcomes proved to be very dependent on the internal structure of the asteroid. The fragments produced from the monolithic target are much smaller than those from the rubble-pile one, while the size and speed distribution of fragments in the former case is steeper and smaller. The hazard assessment implies that although the impact damage to the Earth is reduced from the deflection, there are still a number of small resulting fragments posing threat to the Earth. The expected damage caused by the deflected monolithic target is larger than the rubble-pile target because of the exist of numerous small dangerous fragments. The method presented in this study can be used to infer the impact condition and outcomes in future planetary defense missions.

**Key words:** asteroids deflection; hyper-speed impact process; material point methods; N-body simulation

[责任编辑：高莎，英文审校：任树芳]