0254-6124/2022/42(3)-0463-13 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHOU Qi, ZHENG Jianhua, LI Mingtao. Analysis of Sensitive Parameters of Momentum Transfer Factor in Kinetic Impact Defending Small Bodies (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 463–475. DOI:10.11728/cjss2022.03.210126013

小天体动能撞击防御中动量传递因子敏感参数分析*

周 琪 郑建华 李明涛

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 动量传递因子β是评估动能撞击效果的重要参量。根据动能撞击过程中动量传递因子的理论模型，分析了撞击器特性参数和小天体结构特性参数对动量传递因子取值的影响，并对不同动能撞击方案以及不同材料特性小天体的成坑效应和动量传递因子进行分析。研究表明：标度律参数μ对β影响较大，μ是地面实验拟合得到的系数，与材料强度特性相关；当小天体为单体岩石结构时，撞击器速度及密度、小天体密度及表面强度对β影响较大，而撞击器半径和小天体引力对β影响较小；当小天体为碎石堆结构时，β对撞击器特性参数和小天体特性参数不敏感，且数值较小。对三种不同动能撞击方案的成坑效应与动量传递因子形成规律进行研究，发现撞击器初始动能对β影响较大。当小天体为单体岩石结构时，其对应的动量传递因子取值较大，而当小天体为碎石堆结构时，其对应的β取值较小且基本不变。对相同动能撞击方案下不同材料特性小天体（C 型、S 型和 X 型小行星）产生的撞击效应进行分析，发现在引力主导时，$\beta_C>\beta_S>\beta_X$，而在强度主导时β取值较小且基本相同。

关键词 动能撞击，小天体防御，动量传递因子，标度律，敏感性分析

中图分类号 V412

Analysis of Sensitive Parameters of Momentum Transfer Factor in Kinetic Impact Defending Small Bodies

ZHOU Qi ZHENG Jianhua LI Mingtao

(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Momentum transfer factor β is the key factor to evaluate effect of kinetic impact. In this paper, theoretical model of momentum transfer factor in kinetic impact is investigated, as well as the

* 国防科工局空间碎片和小行星专项资助（kjsp2020020101）

2021-01-26 收到原稿，2022-02-04 收到修定稿

E-mail：zhouqi18@mails.ucas.ac.cn

influence of impactor properties and small body structure properties on the factor. Meanwhile, the crater effect and momentum transfer factor of small bodies with different kinetic impact schemes and structural characteristics are studied. Results show that scaling law parameter μ, a coefficient related to strength properties of target material which is obtained by ground experiment fitting, has a great effect on the factor. The velocity/density of impactor and density/surface strength of small body have a great effect on the factor for small body with a single rock structure, while radius of impactor and gravity of small body have a small effect. In the meantime, the value of β is significant. The factor is insensitive to parameters of impactor properties and small body structure properties for small body with a rubble-pile structure, and its value is close to 1. The formation of crater and momentum transfer factor in three different kinetic impact schemes indicates that the initial kinetic energy of impactor has a great influence on the factor. In the same kinetic impact scheme where gravity dominates the crater formation, the momentum transfer factor of a C-complex asteroid is largest followed by S-complex and X-complex. However, when strength dominates crater formation, the factors of all complexes are smaller and basically the same.

Key words Kinetic impact, Small body defense, Momentum transfer factor, Scaling law, Sensitivity analysis

0 引言

小天体受高速动能撞击会产生很多溅射物，由于小天体引力较弱，一部分溅射物会脱离小天体引力场逃逸出去。溅射物可产生额外的推力，使得小天体的动量改变量大于撞击器的动量，小天体总动量与撞击器动量之比即为动量传递因子(β)。动量传递因子会增强小天体的偏转效果，但是受撞击器和目标小天体特性参数影响而有显著差异[1,2]。对动量传递因子影响因素开展研究，可以为动能撞击方案优化提供参考。

自 1963 年以来，对各种目标小天体材料进行了大量实验室撞击实验[3,4]，以解释溅射过程，并提供溅射物碎片质量、速度、位置分布的定量测量。实验表明，溅射物性质依赖于撞击器特性参数和目标小天体的结构特性[1,5]。由于实验条件通常不能直接适用于小天体表面撞击所涉及的弱引力场、低内聚强度和较大的撞击器尺寸，因此必须利用理论模型推测相关参数值。

2011 年 Housen 等[4] 通过点源理论和无量纲分析建立了溅射物速度与质量分布的溅射标度律理论，通过对撞击实验数据的拟合发现不同撞击器以及目标材质下的溅射物速度与质量分布均存在幂律关系，提供了溅射物质量、速度、位置分布的理论描述。溅射物速度随与撞击位置距离的增加而减小，遵循幂律标度律，在接近撞击点附近时最大，而在接近最终撞击坑边缘时会降为零。基于该标度律，2012 年 Holsapple 等[1] 推导计算出小天体受撞击后的 β。此后，很多关于小天体动能撞击防御的研究使用这一理论估算小天体受撞击后的动量变化情况。2018 年 Delchambre 等[6] 针对小天体的轨道确定滤波器，提出一种端到端的动量传递因子评估模型，对 β 的不确定性进行约束。同时，利用协方差分析和最小二乘迭代分析来评估和验证动量传递因子。Dearborn 等[7] 利用 LLNL 开发的 Spheral 软件以及 LANL 开发的 RAGE 软件进行数值仿真模拟，研究目标特性对动能撞击小天体产生溅射物的影响，并根据仿真结果拟合出 β 的另一种理论模型，给出 β 与撞击速度、目标孔隙率及目标表面强度三者之间的函数关系。

2013 年 Walker 等[8] 使用直径 4.45×10^{-2} m 的小铝球以 2 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 高速撞击直径 1 m 的花岗岩球，根据溅射物的速度分布估算 β，同时外推直径 1 m 的铝球以 10 $\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 超高速撞击岩石类目标小行星表面的动量传递情况，发现撞击器尺寸的幂律达到 0.4，产生的 β 将超过 40。如此大的动量传递因子表明，动能撞击器能够非常有效地偏转单体岩石结构小行星。

2015 年 Hoerth 等[9] 设计动能撞击实验, 以不同孔隙率的岩石作为目标, 计算撞击后的动量传递因子β, 实验发现低孔隙率材料比高孔隙率材料产生的动量传递因子更大。2017 年 Flynn 等[10] 以 DART 任务为背景设计了动能撞击地面实验, 对不同孔隙率的岩石材料进行高速撞击, 发现低孔隙率材料产生的动量传递因子比数值模拟计算结果大得多。

基于一系列初始条件开展的数值仿真研究为系统确定不同类型目标小天体表面产生的撞击效应提供了思路。2016 年 Cheng 等[11] 和 Michel 等[12] 基于 NASA 的双小行星重定向测试(DART)任务, 对动能撞击产生的动量传递因子进行了理论计算和数值仿真研究。2017 年 Stickle 等[13] 用直径6.35×10^{-3} m 的铝球或玄武岩球以 5 ~ 6 km·s^{-1}高速撞击直径 0.3 m 的玄武岩球, 并对比 CTH&Spheral 软件对 DART 任务中动量传递因子的数值仿真结果, 研究撞击角、材料微观和宏观孔隙率对动量传递因子的影响。2018 年 Luther 等[14] 通过数值仿真研究撞击器特性对小天体溅射物质量、速度、溅射角等的影响。2019 年 Raducan 等[15] 给出在均匀小行星表面进行的强度主导撞击的数值仿真, 量化了目标小天体内聚力、孔隙率及内摩擦系数对动能撞击产生的溅射物质量、速度分布的影响。1968 年 Quaide 等[16] 通过室内实验研究目标小天体分层结构对撞击坑形成的影响, 2020 年 Raducan 等[17] 扩展了相应研究, 考虑小天体分层结构对动量传递因子的影响, 量化了目标结构特性对撞击坑形态、溅射物质量、速度分布以及动量传递因子的影响。现有研究表明, 动量传递因子的变化规律和撞击器特性与小天体特性参数存在相关性。

本文考虑模型适用性, 选用 Holsapple 等[1] 给出的动量传递因子理论模型, 分析撞击器特性参数(速度、半径、密度), 小天体结构特性参数(小天体密度、孔隙率、表面强度、表面引力加速度等), 以及标度律参数μ对β的影响, 研究不同参数对动量传递因子影响的敏感性, 并对不同动能撞击方案及小天体特性参数下的撞击场景进行分析, 为设计和评估小天体动能撞击防御方案提供参考。

1　理论模型

2009 年 Warner 等[18] 给出超过 5500 颗小行星自转周期与预估直径的关系[18](见图 1)。自旋界线(Spin Barrier)很明显, 界线上方没有快速自转的大尺寸小行星。由引力聚积形成的小行星结构主要是由引力主导的。相反, 小尺寸小行星在强度主导的区域中, 可以非常快速地自转, 这表明小尺寸小行星可能具有单一结构, 或具有较大的内聚强度。当较大尺寸小行星达到临界自转周期(由其直径、密度、内聚强度决定)时, 其将发生变形、表面物质脱落、裂变或灾难性破坏事件[19]。

当质量为m的动能撞击器以速度u撞击目标小天体时, 会产生大量溅射物。溅射物以一定溅射速度逃逸出小天体引力场, 此时$\beta=1+\dfrac{p_{\rm ej}}{mu}$, 其中$p_{\rm ej}$为溅射物总动量。研究表明, 动量传递因子受撞击速度、撞击器物理特性、撞击角、小天体形状、内部结构特性、自转和孔隙率等因素影响。

为简化模型, 考虑采用质量为m、撞击速度为u的球形撞击器沿小天体中心线垂直撞击球形目标小行星, 使用标度律模型对动量传递因子进行理论解析。标度律采用 Housen 等[4] 给出的形式。在引力或强度主导的情况下, 分别根据常规无量纲标度律参数$\pi_2=\dfrac{gr}{u^2}$和$\pi_3=\dfrac{Y}{\rho u^2}$表示组合标度律。这里$\pi_2$为引力标度律, g为小天体表面引力(单位m·s^{-2}), r为撞击器半径(单位 m), u为撞击速度(单位km·s^{-1}), π_3为强度标度律(材料强度与应力的比值), Y为小天体表面强度(单位 kPa), ρ为小天体密度(单位 kg·m^{-3})。

小天体表面引力主导时, 撞击坑半径

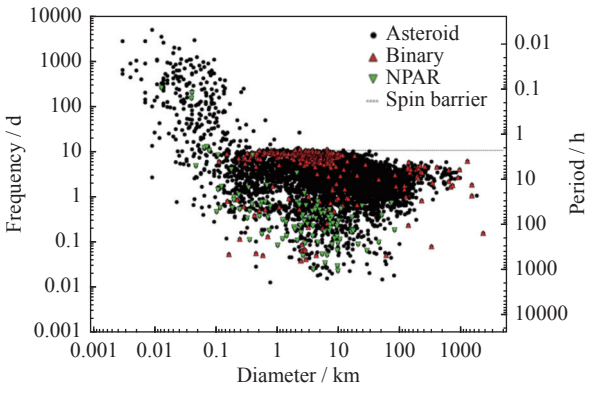


图 1　超过 5500 颗小行星自转周期与预估直径之间的关系

Fig. 1　Relationship between rotation periods and estimated diameters of more than 5500 asteroids

$$R_{cy}\left(\frac{\rho}{m}\right)^{\frac{1}{3}}=H_1\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{2+\mu-6\nu}{3(2+\mu)}}\left(\frac{gr}{u^2}\right)^{-\frac{\mu}{2+\mu}}. \quad (1)$$

如果小天体表面强度主导, 则

$$R_{cy}\left(\frac{\rho}{m}\right)^{\frac{1}{3}}=H_2\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{(1-3\nu)}{3}}\left(\frac{Y}{\rho u^2}\right)^{-\frac{\mu}{2}}. \quad (2)$$

其中, δ为撞击器密度(单位$\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$), m为撞击器质量(单位 kg), H_1、H_2、μ和v为与点源理论相关的经验参数, 根据点源理论耦合参数$C=ru^{\mu}\delta^{\nu}$, 通过实验确定。

无量纲参数H_1和H_2为通过实验确定的每一种材料的常数, 与材料特性相关。无量纲参数μ取决于小天体表面材料强度特性, 其取值范围为$1/3<\mu<2/3$, 其中$\mu=1/3$为动量标度极限, $\mu=2/3$为能量标度极限[20]。根据实验结果, 对于干燥土壤, $\mu\approx0.41$; 对于无孔材料(水、金属或岩石、玄武岩等), $\mu\approx0.55$; 高度多孔材料的μ值尚未确定, 但是预计小于 0.4。有实验设置高度多孔材料孔隙率分别为 55%、67% 和 83%, 拟合得到$\mu=0.35$。已有的实验结果表明, 孔隙率增加对应于更接近动量标度极限的μ值, 其最小取值为 1/3[4]。文献 [4] 数据表明, 不管材料类型如何, 密度标度指数$\nu\approx0.4$, 因此本研究中取无量纲参数$\nu=0.4$。

在距离撞击中心点x处溅射物速度为v, 有

$$\frac{v}{u}=C_1\left[\frac{x}{r}\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\nu}\right]^{-\frac{1}{\mu}}\left(1-\frac{x}{n_2R_{cy}}\right)^{p},$$
$$n_1r\leqslant x\leqslant n_2R_{cy}. \quad (3)$$

其中, C_1和p为通过实验确定的每一种材料的常数, 与材料特性相关。

根据式(3), 在相应溅射速度以上溅射出的质量为M, 有

$$\frac{M}{m}=\frac{3k}{4\pi}\frac{\rho}{\delta}\left[\left(\frac{x}{r}\right)^3-n_1^3\right],\quad n_1r\leqslant x\leqslant n_2R_{cy}. \quad (4)$$

其中, k为实验室实验确定的常数。

式(3)和式(4)显示在实验室撞击实验中得到的溅射速度分布: 在高溅射速度下, $x=n_1r$处溅射物质量为零; 在低溅射速度下, $x=n_2R_{cy}$处溅射速度为零。

在径向距离dx内溅射出的溅射物质量为

$$\mathrm{d}M=\frac{9km}{4\pi}\frac{\rho}{\delta}\left(\frac{x}{r}\right)^2\frac{\mathrm{d}x}{r}. \quad (5)$$

溅射物在无穷远处的动量为$v_{\mathrm{inf}}\cos\theta\mathrm{d}M$。这里$v_{\mathrm{inf}}$为无穷远处的速度, 其中$v_{\mathrm{inf}}=0$表示低于逃逸速度, θ表示溅射角。由于实验室撞击实验中观察到目标靶的溅射角约为 45°[21], 这里以溅射角为 45°开展研究。

通过对$w=x/r$积分, 可以得到溅射物溅射至无穷远处的总动量为[1]

$$p_{\mathrm{ej}}=\frac{9\mathrm{km}}{4\pi}\frac{\rho}{\delta}\int_{n_1}^{\frac{n_2R_{cy}}{r}}\mathrm{d}ww^2v_{\mathrm{inf}}\cos\theta. \quad (6)$$

其中, $u_r=v/v_{\mathrm{esc}}$, 这里v为溅射物速度, v_{esc}为小天体表面逃逸速度。可得偏心率为e的双曲线溅射轨迹, 有

$$\cos\theta=\sin\varphi\sin\alpha-\cos\varphi\cos\alpha, \quad (7)$$
$$\frac{v_{\mathrm{inf}}}{v_{\mathrm{esc}}}=\sqrt{u_r^2-1}, \quad (8)$$
$$e\cos\varphi=u_r^2-1, \quad (9)$$
$$e=\left[1+2u_r^2\left(u_r^2-1\right)\right]^{1/2}=\frac{1}{\cos\alpha}, \quad (10)$$

则动量传递因子为

$$\beta-1=\frac{p_{\mathrm{ej}}}{mu}. \quad (11)$$

通过实验室实验数据观测, 可以得出式(3)的近似表示[1], 即

$$\frac{v}{u}\cong C_1\left[\frac{x}{a}\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\nu}\right]^{-\frac{1}{\mu}},$$
$$n_1r\leqslant x\leqslant 0.74n_2R_{cy}. \quad (12)$$

由$v_{\mathrm{inf}}\cos\theta\cong\frac{v}{\sqrt{2}}$可得动量传递因子为[1]

$$\beta-1\cong\frac{9kC_1}{4\pi\sqrt{2}}\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{(\mu-\nu)/\mu}\frac{\mu}{3\mu-1}\cdot$$
$$\left[\left(0.74n_2\frac{R_{cy}}{r}\right)^{(3\mu-1)/\mu}-n_1^{(3\mu-1)/\mu}\right]. \quad (13)$$

式(13)中的系数 0.74 是通过对式(6)进行数值积分拟合得到的。如果忽略式(13)中括号内最后一项, 利用式(2)可得[1]

$$\beta-1\propto(kC_1)\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{1-3\nu}\left(\frac{\mu}{3\mu-1}\right)H_2^{\frac{3\mu-1}{\mu}}\left(\frac{u}{\sqrt{\frac{Y}{\rho}}}\right)^{3\mu-1}. \quad (14)$$

对于高度多孔的目标小天体材料, 参数μ可能接近 1/3。另外, 动能撞击产生的动量传递因子β大小还取决于撞击角和目标结构, 在随后的数值仿真中将讨论其影响。

2　动量传递因子的参数敏感性

根据第 1 节介绍的动量传递因子理论模型, 对模型公式进行参数敏感性分析, 找出各参数对动量传递因子的影响规律。

目标材料类型一直是动能撞击效应相关研究的核心因素之一。2007 年 Richardson 等[22] 取 Holsapple 在 1993 年给出的材料类型——砂、湿土、干土、软石块和硬石块等, 重建了撞击溅射模型, 对比深度撞击任务观测结果, 精确评估 9 P/Tempel 1 彗星的表面引力、质量和密度。同时, Holsapple 等[23] 取 Richardson 等在 2005 年给出的材料类型, 即粗砂和不同强度的粘性土壤以及软石块等, 建立撞击坑及溅射物的分布模型, 对比观测结果, 解释深度撞击任务的撞击效应。Ernst 等[24] 根据 9 P/Tempel 1 彗星材料特性, 选择不同材料类型——浮石、珍珠岩、白云石等, 评估材料类型对撞击闪光演化的影响。2010 年 Hermalyn 等[25] 在 NASA 艾姆斯研究中心垂直射击场(AVGR)采用空心铝球撞击 20#～30#砂和浮石靶材, 与此前研究进行比对, 以更好地解释撞击参数对 2009 年 LCROSS 撞击任务中撞击月球陨石坑产生的早期溅射物分布的影响, 对溅射物速度分布的时间和热力学演化进行测量, 评估不同溅射物组分的质量分布、溅射角度分布以及撞击坑深度。2017 年 Arakawa 等[21] 针对 Ryugu 小行星探测任务中的 SCI(Small Carry-on Impactor)撞击模块, 首次预设 Ryugu 小行星表面可能存在的 7 种材料类型, 按照材料颗粒层直径分类, 同时给出预期撞击坑直径和适用的主导律(引力主导或强度主导)。

2020 年 Cheng 等[26,27] 给出 DART 任务分析动量传递因子时使用的材料类型(见表 1)[4]。对表 1 中材料结构进行敏感性分析。表 1 给出的材料结构经验参数是基于实验室中溅射物分布实验数据得到的, 5 种材料类型分别对应小天体不同类型结构: 石块材料结构对应单体岩石结构小天体, 粗砂、弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物四种材料结构对应碎石堆结构小天体。

图 2 给出了小天体 5 种类型表面的典型图像[21]。

表 1　可参考的材料经验参数

Table 1　Experience parameters of materials

材料结构编号	1	2	3	4	5
主导因素	引 力	强 度	强 度	强 度	强 度
材料类型	粗 砂	石 块	弱胶合玄武岩	致密沙土	珍珠岩/沙土混合物
宏观孔隙率n/(%)	35 ± 5	0	20	45	60
μ	0.41	0.55	0.46	0.4	0.35
ν	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
C_1	0.55	1.5	0.18	0.55	0.6
k	0.3	0.3	0.3	0.3	0.32
H_1(引力)	0.59	—	—	—	—
H_2(强度)	—	1.1	0.38	0.4	0.81
n_1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
$n_{2,G}$(引力)	1.3	—	—	—	—
$n_{2,S}$(强度)	—	1	1	1	1
撞击器密度δ/(kg · m^{-3})	1220	2700	2700	930	940
撞击器半径r($\times10^{-3}$)/m	3.9	1.6	3.6	7	8.7
撞击速度u/(km · s^{-1})	6-7	6.2	1.8	1.9	1.8
目标密度ρ/(kg · m^{-3})	1510	3000	2600	1500	1200
引力加速度g/(m · s^{-2})	9.81	—	—	—	—
Y/kPa	—	3×10^4	4.5×10^2	4	2

将直径大于 1.5 m 的岩石设定为单体石块，设置的撞击体无法完全破坏该石块，其可能在石块上形成一个简单的撞击坑，或部分破坏石块，单体石块上所形成的撞击坑属于强度主导。颗粒层是颗粒直径在 1×10^{-3}～1.5×10^{-1} m 的层。颗粒层中包含：弱胶合玄武岩，粒径为 5×10^{-2}～1.5×10^{-1} m；粗砂，粒径为 1×10^{-3}～5×10^{-2} m。最后，细颗粒层是颗粒直径小于 1×10^{-3} m 的层。细颗粒层中包含：致密沙土，孔隙率为 40%～45%；珍珠岩/沙土混合物，孔隙率为 60%。这 5 种类型的表面结构合理涵盖了小天体可能的表面结构范围。因此，这里在考虑这 5 种结构材料情况下对撞击坑的成坑规律和动量传递规律进行参数敏感性研究。

按上述动量传递因子模型，分别考虑引力主导和强度主导对动量传递因子形成规律进行分析。在参数敏感性分析时，需要考虑诸多因素，为此建立了参数取值范围（见表 2），开展参数对动量传递因子的影响规律分析。

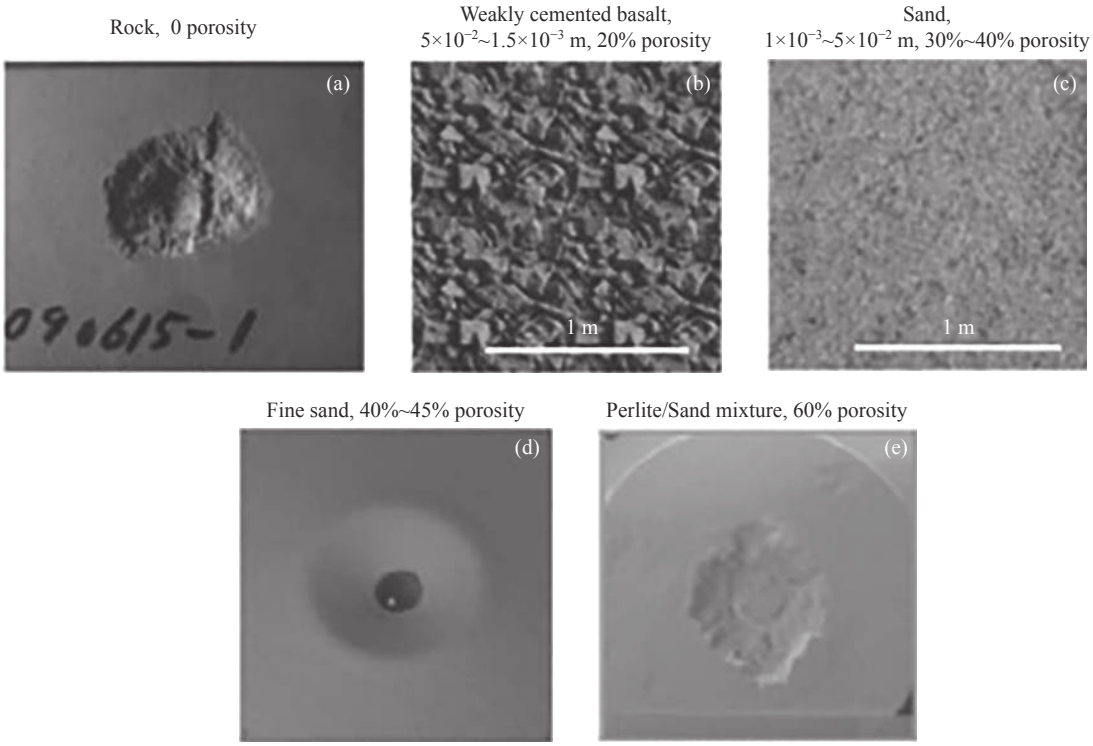


图 2 小天体表面的 5 种类型

Fig. 2 Five types of surfaces of small bodies

表 2 特性参数可取值范围

Table 2 Range of property parameters

特性参数	取值范围	备注
撞击速度u/(km · s^{-1})	1～10	撞击器的典型撞击速度[28,29]
撞击器密度δ/(kg · m^{-3})	300～3000	考虑撞击器类型为两种：人造撞击器或者太空岩石[28,29]
撞击器半径r($\times10^{-3}$)/m	1～10	地面针对动能撞击小天体的撞击实验中撞击器半径设定在10^{-3}～10^{-2} m量级[4]
小天体密度ρ/(kg · m^{-3})	600～6000	考虑小天体中彗星密度最小，金属小行星密度最大[30-32]
小天体引力加速度g($\times10^{-5}$)/(m · s^{-2})	1～10	考虑小天体典型弱引力场数值在10^{-5}～10^{-4} m · s^{-2}量级[33]，小天体尺寸在6～600 m量级
小天体表面内聚强度Y/kPa	1×10^{-1}～1×10^{5}	考虑小天体中彗星的孔隙率较大，表面内聚强度最小，在100 Pa以上，而金属小行星密度大，表面内聚强度最大，在100 MPa左右[30,32]
标度律参数μ	$1/3<\mu<2/3$	μ取值范围为其最大可取范围[4,20]

图 3 给出了引力主导时, 各参数分别提升一个数量级后, 动量传递因子的形成规律。由图 3 可知, 小天体为碎石堆结构时, 小天体撞击效应为引力主导, 动量传递因子对撞击器特性参数与小天体特性参数均不敏感, 并且动量传递因子取值较低。在标称情况下, $\beta \approx 1.8177$。

从图 3 可以看出: 撞击器密度提升 1 个数量级, 粗砂结构中 β 提升 22.53%, 撞击器密度对 β 取值不敏感; 撞击器半径提升 1 个量级, 粗砂结构中 β 降低 11.30%, 撞击器半径对 β 取值不敏感; 撞击速度提升 1 个量级, 粗砂结构中 β 提升 25.16%, 撞击速度对 β 取值不敏感; 小天体引力加速度提升 1 个量级, β 降低 16.07%, 小天体引力加速度对 β 取值不敏感; 小天体密度提升 1 个量级, 粗砂结构中 β 取值降低了 18.42%, 小天体密度对 β 取值不敏感; 按参数 μ 取值范围, $1/3 < \mu < 2/3$, 粗砂结构中 β 取值产生了 1 个量级的提升, 可以看出目标材料相关参数 μ 对 β 取值极敏感。

图 4 给出了强度主导时, 各参数分别提升 1 个数量级后动量传递因子的形成规律。由图 4 可知, 强度主导时, 石块(约 0%)、弱胶合玄武岩(20%)、致密沙土(45%)、珍珠岩/沙土混合物(60%)四种材料结构形成的动量传递因子变化规律相似。相比后三种碎石堆结构, 单体岩石结构形成的动量传递因子取值变化比较显著; 小天体为碎石堆结构时, 动量传递因子对撞击器特性参数与小天体特性参数均不敏感。

图 4 显示, 当撞击器密度提升 1 个数量级时, 石块、弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物等四种材料结构中 β 分别提升了 54.7%、5.44%、17.31%、17.87%, 石块结构中 β 取值提升幅度较大, 弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物三种碎石堆结构中 β 取值提升幅度较小。撞击器密度在小天体为单体岩石结构时对 β 取值较敏感, 在小天体为碎石堆结构时对 β 取值不敏感。强度主导时, 撞击器半径与 β 不相关, 其对 β 取值不敏感。当撞击速度提升 1 个量级时, 弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物三种碎石堆结构中 β 分别提升 11.96%、18.53%、8.96%, 提升幅度较小, 而石块结构中 β 取值提升幅度较大, 提升了 2.1033 倍。撞击速度在小天体为单体岩石结构时对 β 取值敏感, 在小天体为碎石堆结构时对 β 取值不敏感。当小天体表面内聚强度提升 6 个量级, 弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物三种碎石堆结构中 β 取值降低幅度较小, 分别为 22.35%、24.39%、23.14%, 石块结构中 β 取值降低幅度很大, 下降了 95.10%。小天体表面内聚强度在小天体为单体岩石结构时对 β 取值敏感, 在小天体为碎

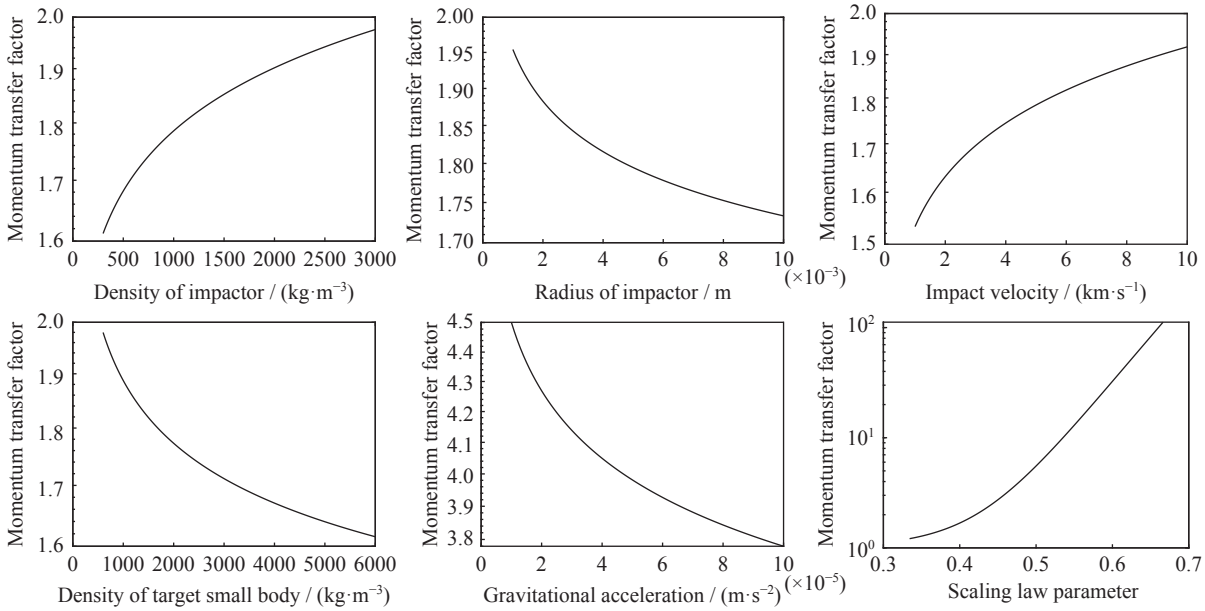


图 3　引力主导时动量传递因子随各参数的分布（材质孔隙率 30%～40%）

Fig. 3　Distribution of momentum transfer factor β with each parameter when gravity dominates (Porosity of the material is between 30% and 40%)

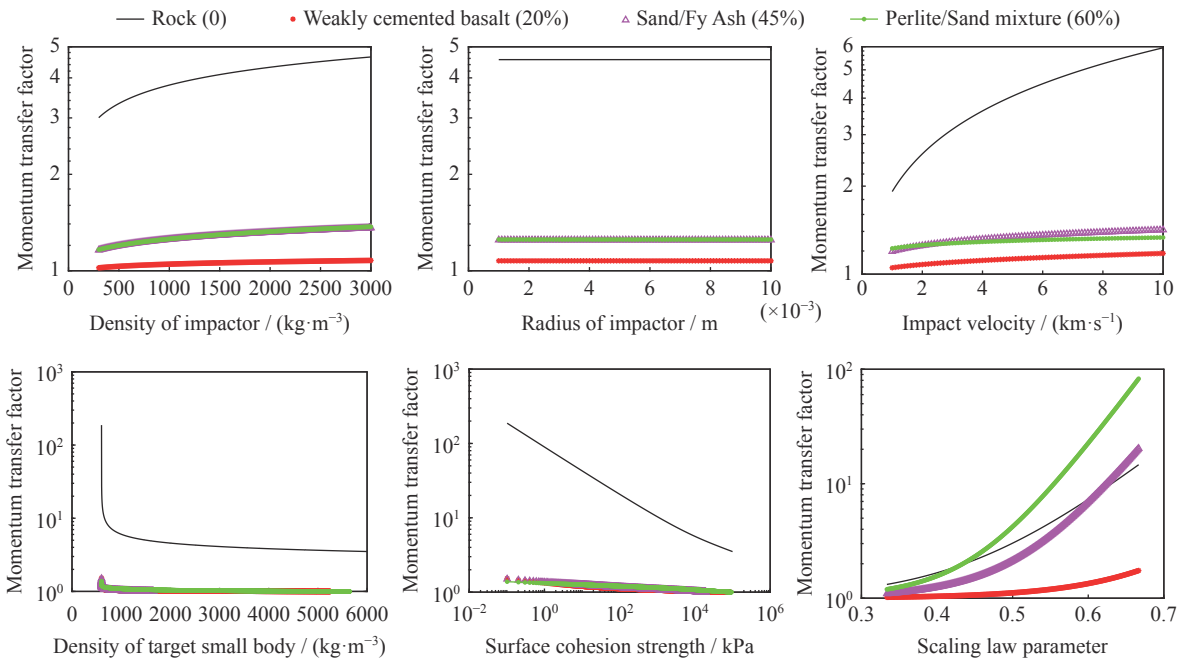


图 4 强度主导时动量传递因子随各参数的分布

Fig. 4 Distribution of momentum transfer factor β with each parameter when strength dominates

石堆结构时对 β 取值不敏感。当小天体密度提升 1 个量级，弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物三种碎石堆结构中 β 取值降低幅度较小，分别为 22.35%、24.39%、23.14%，石块结构中 β 取值降低幅度很大，下降了 95.10%。小天体密度在小天体为单体岩石结构时对 β 取值极敏感，在小天体为碎石堆结构时对 β 取值不敏感。同时，石块结构中的 β 取值比碎石堆结构中 β 取值大得多，这也意味着动能撞击防御单体岩石结构小天体取得的预期效果将比碎石堆结构小天体要好得多。按参数 μ 取值范围，$1/3 < \mu < 2/3$，石块、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物三种材料结构中 β 取值均产生了 1 个量级的提升，弱胶合玄武岩材料结构（孔隙率为 20%）中 β 取值提升幅度较小，为 71.12%。综上可得，材料相关参数 μ 对 β 取值极敏感。

对比图 3 与图 4 可以发现，无论引力主导还是强度主导，撞击器密度、撞击速度和参数 μ 与动量传递因子成正相关，小天体引力加速度、小天体表面内聚强度和小天体密度与动量传递因子负相关；在引力主导时，撞击器半径与动量传递因子负相关；在强度主导时，动量传递因子 β 的形成与撞击器半径无相关性。各参数与动量传递因子的相关性列于表 3。

3 小天体防御动能撞击效应

3.1 不同动能撞击方案撞击小天体产生的撞击效应

以 Apophis 小行星作为动能撞击目标，进行不同动能撞击方案产生的撞击效应分析，相关参数列于表 4[34,35]。分别选择表 1 中的石块、粗砂（引力主导）、弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物 5 种材料结构作为 Apophis 小行星可参考的结构类型。动能撞击效应包括撞击坑半径和撞击坑深度的成坑效应[36] 以及动量传递因子。

参考文献 [28, 29] 中给出的动能撞击方案进行分析，动能撞击方案具体参数列于表 5。

（1）经典动能撞击方案（Classic Kinetic Impact, CKI）：发射一颗无人航天器，以高速撞击危地小天体，偏转其轨道。

（2）含末级动能撞击方案（Assembled Kinetic Impact, AKI）：2020 年 Wang 等[28] 提出将航天器与火箭末级作为组合撞击器的新型动能撞击概念，即火箭末级将航天器送入地球逃逸轨道后，不实施星箭分离，航天器操控航天器与火箭末级组合撞击体撞击危地小天体，充分利用火箭末级的质量，提升撞击器在撞击小天体时的质量，显著改变小天体的动量，进而偏转小天体的轨道。

表 3　引力/强度主导时参数与动量传递因子相关性

Table 3　Correlation between parameters and momentum transfer factor when gravity/strength dominates

参数	主导因素	与 β 的相关性
参数μ	引力/强度主导	正相关
撞击器密度δ/(kg · m^{-3})	引力/强度主导	正相关
撞击器半径r($\times10^{-3}$)/m	引力主导	负相关
	强度主导	不相关
撞击速度u/(km · s^{-1})	引力/强度主导	正相关
小天体密度ρ/(kg · m^{-3})	引力/强度主导	负相关
小天体引力加速度g ($\times10^{-5}$)/(m · s^{-2})	引力/强度主导	负相关
小天体表面内聚强度Y/kPa	引力/强度主导	负相关

表 4　Apophis 小行星参数

Table 4　Parameters of Apophis asteroid

参数	遥感探测数据
小行星直径R/m	375^{+14}_{-10}
小行星密度ρ/(kg · m^{-3})	$(3.2\pm0.2)\times10^3$(LL型球粒陨石)
小行星宏观孔隙率n/(%)	0 ~ 50(平均: 20)
小行星质量M($\times10^{10}$)/kg	4.4 ~ 6.2(平均: 5.3 ± 0.9)
小行星引力加速度g($\times10^{-5}$)/(m · s^{-2})	8.3511 ~ 11.767
小行星表面逃逸速度v_{esc}/(m · s^{-1})	0.1770 ~ 0.2101

表 5　三种不同动能撞击器参数

Table 5　Parameters for kinetic impactors of three types

参数	经典动能撞击 纯铝材料	含末级动能撞击 纯铝材料	以石击石加强型动能撞击 岩石材料
有效密度δ/(kg · m^{-3})	74.6129	118.8501	1457.1070
质量m($\times10^3$)/kg	3.56	8.75	200
半径r/m	2.25	2.6	3.2
撞击速度u/(km · s^{-1})	6.57	7.17	12
撞击动能E_{imp}($\times10^{10}$)/J	7.6834	22.491	1440
撞击角φ/(°)	90	90	90

(3) 以石击石加强型动能撞击方案(Enhanced Kinetic Impact, EKI): 2020 年 Li 等[29] 提出, 发射一颗无人航天器, 捕获一颗百吨级质量的小尺寸小天体或者从大尺寸小天体上采集百吨级质量的岩石, 高速撞击大尺寸危地小天体, 显著偏转其轨道。

根据仿真计算, 三种不同动能撞击方案的成坑效应与动量传递因子的比较分别见图 4 和图 5。

由图 5 可以看出, 引力标度律主导时, 三种撞击方案中, 以石击石加强型动能撞击产生的成坑效应是最显著的。对于撞击坑半径和撞击坑深度两个指标, 末级动能撞击只在经典撞击的基础上提升了 35.56%, 而以石击石加强型动能撞击产生的撞击坑半径超过了小行星半径, 可以认为加强型动能撞击能够将 Apophis 小行星撞碎。对于动量传递因子, 末级动能撞击只在经典动能撞击的基础上提升了 4.42%, 而以石击石提升了 40.65%。以石击石方案中撞击器质量

为经典动能撞击方案中撞击器质量的 56 倍，以石击石撞击器的初始动能是经典动能撞击器初始动能的近 187 倍，由此推断，撞击器初始动能对动量传递因子影响较大。

图 6 显示，强度标度律主导时，三种动能撞击方案产生的成坑效应与引力主导时相似，以石击石加强型动能撞击产生的撞击坑半径和撞击坑深度数值较大。而横向比较时，小天体若是碎石堆结构，可以看出，弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物三种结构孔隙率逐步提升，而对应的动能撞击产生的撞击坑半径和撞击坑深度数值也在不断升高。这表明，小天体结构孔隙率对撞击坑尺寸影响较大。对单体岩石结构，其对应的动能撞击产生的撞击坑尺寸与孔隙率为 45% 的致密沙土结构基本一致，其原因尚不明确，有待开展进一步的数值仿真研究。同时，弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物三种碎石堆结构对应的动量传递因子基本不变，对动量传递因子形成规律表现出较强的一致性。对于单体岩石结构，其对应的动量传递因子取值较大，与碎石堆结构表现出的规律特性明显不同，该结论与第 2 节中参数敏感性分析得出的结论一致。

3.2 对不同材料特性小天体采取相同动能撞击方案产生的撞击效应

这里，选择 Ryugu 小行星（C 型）[37-39]、Apophis 小行星（S 型）[34,35] 以及 1950 DA 小行星（X 型）[40-42] 作为动能撞击目标小天体，对应小行星的相关特性参数列于表 6。分别选择表 1 中的粗砂（引力主导）、弱胶合玄武岩、致密沙土、珍珠岩/沙土混合物 4 种材料结构作为目标小天体参考结构类型。同时，选择含末级动能撞击方案，进行相同动能撞击方案产生的撞击效应分析，如图 7 和图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以看出，末级动能撞击不同类型小行星，产生的撞击坑尺寸排序为：$R_{\mathrm{cy,C}} > R_{\mathrm{cy,S}} > R_{cy,\mathrm{X}}$，$H_{cy,\mathrm{C}} > H_{\mathrm{cy,S}} > H_{\mathrm{cy,X}}$。这三种类型小行星对应的动量传递因子，在引力主导时，$\beta_{\mathrm{C}} > \beta_{\mathrm{S}} > \beta_{\mathrm{X}}$，而在强度主导时基本相同。对于 Ryugu 小行星（C 型），隼鸟

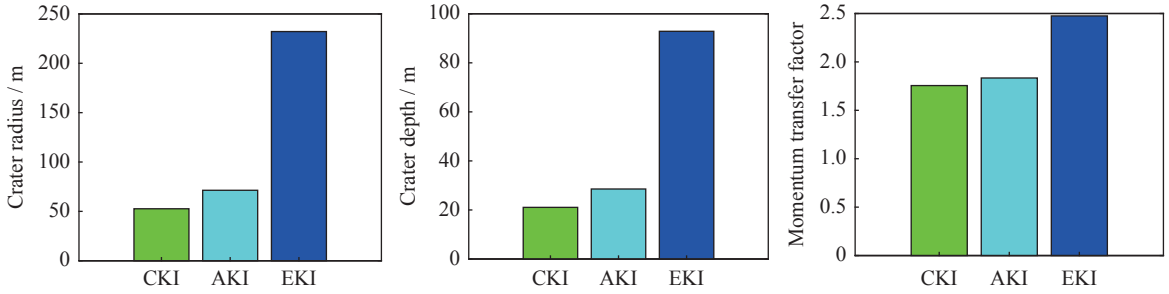


图 5 引力主导时三种不同动能撞击方案的成坑效应与动量传递因子

Fig. 5 Cratering effects and momentum transfer factors for kinetic impact schemes of three types when gravity dominates

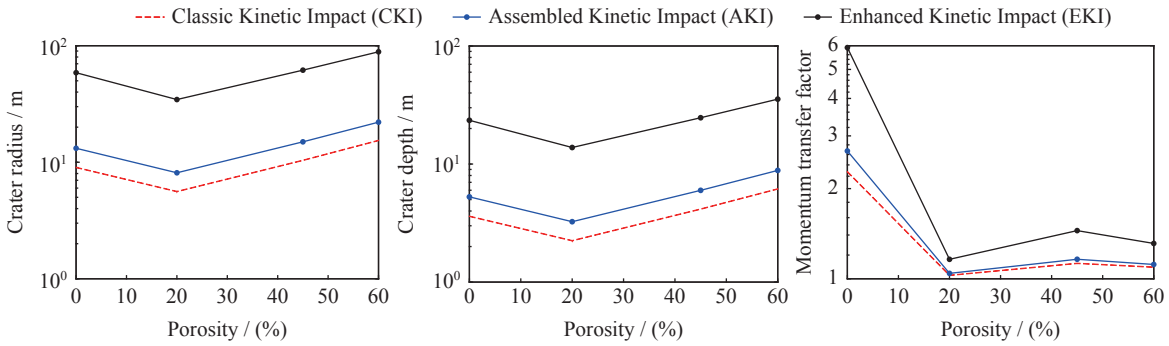


图 6 强度主导时三种不同动能撞击方案的成坑效应与动量传递因子

Fig. 6 Cratering effects and momentum transfer factors for kinetic impact schemes of three types when strength dominates

表 6　不同类型小行星参数

Table 6　Parameters for asteroids of different types

参数	Ryugu小行星	Apophis小行星	1950 DA小行星
小行星直径R/m	$(1.04\times1.02\times0.88)\times10^3$	375^{+14}_{-10}	$(1.25\pm0.12)\times10^3$
小行星密度$\rho(\times10^3)/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	1.19 ± 0.02	3.2 ± 0.2	3.5 ± 0.35
小行星宏观孔隙率n/(%)	>50(高孔隙率)	0～50(平均：20)	51 ± 19
小行星质量$M(\times10^{10})$/kg	44.975	4.4～6.2(平均: 5.3 ± 0.9)	399
小行星引力加速度$g(\times10^{-5})/(\mathrm{m\cdot s^{-2}})$	12	8.3511～11.767	14.185～20.850
小行星表面逃逸速度$v_{\mathrm{esc}}/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	0.3652	0.1770～0.2101	0.6234～0.6865

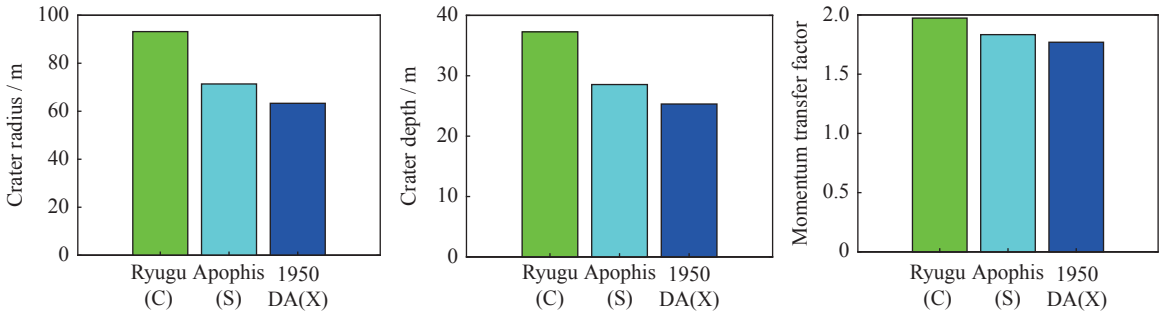


图 7　引力主导时末级动能撞击三种不同类型小行星的撞击效应指标

Fig. 7　Index of impact effects for asteroids of three different types with final kinetic impact when gravity dominates

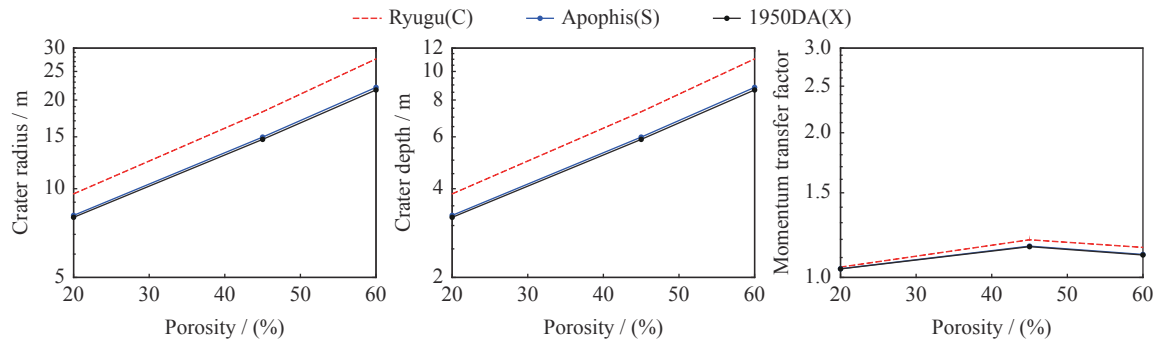


图 8　强度主导时末级动能撞击三种不同类型小行星的撞击效应指标

Fig. 8　Index of impact effects for asteroids of three different types with final kinetic impact when strength dominates

二号探测器在龙宫小行星表面撞击产生了一个直径 17.6 m 左右的撞击坑，探测结果表明 Ryugu 小行星表面是引力主导成坑的。而对于 Apophis 小行星(S 型)和 1950 DA 小行星(X 型)，尚不明确是引力主导还是强度主导成坑的。

4　结论

依据动量传递因子的理论模型开展参数敏感性研究，结果表明，参数μ对动量传递因子取值极为敏感，影响较大。当小天体为单体岩石结构时，撞击器的速度和密度以及小天体的密度和表面强度对动量传递因子影响较大，而撞击器半径和小天体引力加速度对动量传递因子影响较小。当小天体为碎石堆结构时，动量传递因子对撞击器特性参数及小天体特性参数不敏感，且数值较小。

依据理论模型，对三种不同动能撞击方案的撞击坑尺寸与动量传递因子形成规律进行研究，发现撞击

器初始动能对动量传递因子影响较大，小天体结构孔隙率对撞击坑尺寸影响较大。同时，对于单体岩石结构，其对应的动量传递因子取值较大，而碎石堆结构对应的动量传递因子取值较小，且在三种碎石堆结构中基本保持不变。此外，以石击石加强型动能撞击产生的撞击效应显著，具有较好的动能防御优势。

对于相同末级动能撞击方案下不同材料特性小行星（C 型、S 型和 X 型）产生的撞击效应进行分析，发现用末级动能撞击不同材料特性小行星，其产生的撞击坑尺寸排序为$R_{\mathrm{cy,C}}>R_{\mathrm{cy,S}}>R_{\mathrm{cy,X}}$，$H_{\mathrm{cy,C}}>H_{\mathrm{cy,S}}>H_{\mathrm{cy,X}}$。这三种材料特性小行星对应的动量传递因子，在引力主导时，$\beta_{\mathrm{C}}>\beta_{\mathrm{S}}>\beta_{\mathrm{X}}$，而在强度主导时取值较小，且基本相同。

本文以动量传递因子理论模型开展参数敏感性研究，对动能撞击防御场景的应用，为后续利用数值仿真模型研究动量传递因子提供了理论依据，并为设计和评估高效的动能撞击防御小天体方案提供参考。

参考文献

[1] HOLSAPPLE K A, HOUSEN K R. Momentum transfer in asteroid impacts. I. Theory and scaling[J]. *Icarus*, 2012, **221**(2): 875-887

[2] SYAL M B, OWEN J M, MILLER P L. Deflection by kinetic impact: sensitivity to asteroid properties[J]. *Icarus*, 2016, **269**: 50-61

[3] GAULT D E, SHOEMAKER E M, MOORE H J, *et al.* Spray Ejected from the Lunar Surface by Meteoroid Impact[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1963

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

[5] MICHEL P. Physical properties of Near-Earth Objects that inform mitigation[J]. *Acta Astronautica*, 2013, **90**(1): 6-13

[6] DELCHAMBRE S, ZIEGLER T, FALKE A, *et al.* Momentum enhancement factor estimation for asteroid redirect missions[J]. *Acta Astronautica*, 2018, **151**: 125-136

[7] DEARBORN D S P, SYAL M B, BARBEE B W, *et al.* Options and uncertainties in planetary defense: impulse-dependent response and the physical properties of asteroids[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **166**: 290-305

[8] WALKER J D, CHOCRON S, DURDA D D, *et al.* Momentum enhancement from aluminum striking granite and the scale size effect[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, **56**: 12-18

[9] HOERTH T, SCHÄFER F, HUPFER J, *et al.* Momentum transfer in hypervelocity impact experiments on rock targets[J]. *Procedia Engineering*, 2015, **103**: 197-204

[10] FLYNN G J, DURDA D D, PATMORE E B, *et al.* Momentum enhancement from hypervelocity crater ejecta: implications for the AIDA target[C]//(Abstract) European Planetary Science Congress 2017. Riga: EPSC, 2017, 11: EPSC2017-292

[11] CHENG A F, MICHEL P, JUTZI M, *et al.* Asteroid impact & deflection assessment mission: kinetic impactor[J]. *Planetary and Space Science*, 2016, **121**: 27-35

[12] MICHEL P, CHENG A, KÜPPERS M, *et al.* Science case for the asteroid impact mission (AIM): a component of the asteroid impact & deflection assessment (AIDA) mission[J]. *Advances in Space Research*, 2016, **57**(12): 2529-2547

[13] STICKLE A M, RAINEY E S G, SYAL M B, *et al.* Modeling impact outcomes for the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission[J]. *Procedia Engineering*, 2017, **204**: 116-123

[14] LUTHER R, ZHU M H, COLLINS G, *et al.* Effect of target properties and impact velocity on ejection dynamics and ejecta deposition[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2018, **53**(8): 1705-1732

[15] RADUCAN S D, DAVISON T M, LUTHER R, *et al.* The role of asteroid strength, porosity and internal friction in impact momentum transfer[J]. *Icarus*, 2019, **329**: 282-295

[16] QUAIDE W L, OBERBECK V R. Thickness determinations of the lunar surface layer from lunar impact craters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, **73**(16): 5247-5270

[17] RADUCAN S D, DAVISON T M, COLLINS G S. The effects of asteroid layering on ejecta mass-velocity distribution and implications for impact momentum transfer[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **180**: 104756

[18] WARNER B D, HARRIS A W, PRAVEC P. The asteroid lightcurve database[J]. *Icarus*, 2009, **202**(1): 134-146

[19] SÁNCHEZ P, SCHEERES D J. Rotational evolution of self-gravitating aggregates with cores of variable strength[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, **157**: 39-47

[20] HOLSAPPLE K A, SCHMIDT R M. Point source solutions and coupling parameters in cratering mechanics[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1987, **92**(B7): 6350-6376

[21] ARAKAWA M, WADA K, SAIKI T, *et al.* Scientific objectives of small carry-on impactor (SCI) and Deployable Camera 3 digital (DCAM3-D): observation of an ejecta curtain and a crater formed on the surface of Ryugu by an artificial high-velocity impact[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **208**(1/2/3/4): 187-212

[22] RICHARDSON J E, MELOSH H J, LISSE C M, *et al.* A ballistics analysis of the deep impact ejecta plume: determining comet tempel 1's gravity, mass, and density[J]. *Icarus*, 2007, **190**(2): 357-390

[23] HOLSAPPLE K A, HOUSEN K R. A crater and its ejecta: an interpretation of Deep Impact[J]. *Icarus*, 2007,

191(2): 586-597

[24] ERNST C M, SCHULTZ P H. Evolution of the Deep Impact flash: implications for the nucleus surface based on laboratory experiments[J]. *Icarus*, 2007, **190**(2): 334-344

[25] HERMALYN B, SCHULTZ P H, COLAPRETE A. LCROSS ejecta dynamics: insight from experiments[C]// 41 st Lunar and Planetary Science Conference. Texas: Lunar and Planetary Institute, 2010

[26] CHENG A F, STICKLE A M, FAHNESTOCK E G, *et al*. DART mission determination of momentum transfer: model of ejecta plume observations[J]. *Icarus*, 2020, **352**: 113989

[27] CHENG A F, RIVKIN A S, MICHEL P, *et al*. AIDA DART asteroid deflection test: planetary defense and science objectives[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, **157**: 104-115

[28] WANG Y R, LI M T, GONG Z Z, *et al*. Assembled Kinetic Impactor for Deflecting Asteroids by Combining the Spacecraft with the Launch Vehicle Upper Stage[J]. *Icarus*, 2021, **368**: 114596

[29] LI M T, WANG Y R, WANG Y L, *et al*. Enhanced kinetic impactor for deflecting large potentially hazardous asteroids via maneuvering space rocks[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 8506

[30] BRITT D T, YEOMANS D, HOUSEN K, *et al*. Asteroid density, porosity, and structure[M]//BOTTKE W F, CELLINO A, PAOLICCHI P, *et al*. Asteroids III. Tucson: University of Arizona Press, 2002: 485-500

[31] CARRY B. Density of asteroids[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, **73**(1): 98-118

[32] BIELE J, ULAMEC S, RICHTER L, *et al*. The putative mechanical strength of comet surface material applied to landing on a comet[J]. *Acta Astronautica*, 2009, **65**(7/8): 1168-1178

[33] BRISSET J, COLWELL J, DOVE A, *et al*. Regolith behavior under asteroid-level gravity conditions: low-velocity impact experiments[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, **5**(1): 73

[34] BINZEL R P, RIVKIN A S, THOMAS C A, *et al*. Spectral properties and composition of potentially hazardous Asteroid (99942) Apophis[J]. *Icarus*, 2009, **200**(2): 480-485

[35] MÜLLER T G, KISS C, SCHEIRICH P, *et al*. Thermal infrared observations of asteroid (99942) Apophis with *Herschel*[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, **566**: A22

[36] TAKIZAWA S, KATSURAGI H. Scaling laws for the oblique impact cratering on an inclined granular surface[J]. *Icarus*, 2020, **335**: 113409

[37] KOVÁČOVÁ M, NAGY R, KORNOŠ L, *et al*. 101955 Bennu and 162173 Ryugu: dynamical modelling of ejected particles to the Earth[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **185**: 104897

[38] OKADA T, FUKUHARA T, TANAKA S, *et al*. Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging[J]. *Nature*, 2020, **579**(7800): 518-522

[39] WATANABE S, HIRABAYASHI M, HIRATA N, *et al*. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu-A spinning top-shaped rubble pile[J]. *Science*, 2019, **364**(6437): 268-272

[40] GUNDLACH B, BLUM J. Regolith grain size and cohesive strength of near-Earth Asteroid (29075) 1950 DA[J]. *Icarus*, 2015, **257**: 126-129

[41] FARNOCCHIA D, CHESLEY S R. Assessment of the 2880 impact threat from Asteroid (29075) 1950 DA[J]. *Icarus*, 2014, **229**: 321-327

[42] BUSCH M W, GIORGINI J D, OSTRO S J, *et al*. Physical modeling of near-Earth Asteroid (29075) 1950 DA[J]. *Icarus*, 2007, **190**(2): 608-621

(责任编辑: 宋雅娜)