

# 超高速动能撞击密实小行星的动量传递规律

刘文近<sup>1</sup>, 张庆明<sup>1</sup>, 龙仁荣<sup>1</sup>, 龚自正<sup>2</sup>, 任健康<sup>1</sup>, 任思远<sup>2</sup>,  
武强<sup>2</sup>, 宋光明<sup>2</sup>, 陈川<sup>2</sup>, 张品亮<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 动能撞击被认为是使潜在威胁小行星偏离与地球碰撞轨道的有效方法。基于撞击速度对动量传递系数的影响规律, 利用二级轻气炮进行了6 mm铅弹丸以2~4 km/s超高速撞击玄武岩靶试验, 利用AUTODYN光滑粒子流体动力学方法开展了数值模拟, 将模拟结果和试验结果进行了比较, 验证了计算模型和参数的准确性。模拟结果表明在不同撞击速度下抛射物的质量和速度分布基本一致, 撞击速度越大累计抛射物质量越大。结合试验和数值模拟结果, 获得了动能撞击密实小行星的动量传递系数相似律, 密实小行星的动量增强系数随撞击速度的0.65次方的增大而增大。动量传递相似律可为动能撞击偏转小行星提供数据支撑。

**关键词:** 超高速碰撞; 相似律; 行星防御; 数值模拟

**中图分类号:** P185.7; O383; V412

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2023)04-0420-08

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230042

**引用格式:** 刘文近, 张庆明, 龙仁荣, 等. 超高速动能撞击密实小行星的动量传递规律[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(4): 420-427.

**Reference format:** LIU W J, ZHANG Q M, LONG R R, et al. Momentum transfer law of hypervelocity kinetic impacting dense asteroids[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(4): 420-427.

## 引言

虽然小行星和彗星撞击地球的概率低, 但后果和危害极其严重<sup>[1]</sup>。动能撞击目前被认为是使对地球有潜在威胁小行星偏离与地球碰撞轨道的最有效方法<sup>[2]</sup>。2021年11月24日美国成功发射了“双小行星重定向测试”(Double Asteroid Redirection Test, DART)探测器, 于2022年9月26日以超过6.2 km/s的速度撞击双小行星Didymos的次星Dimorphos, 成功进行了人类历史上第1次全尺寸的小行星动能撞击偏转测试试验<sup>[3]</sup>。小行星是一个多样化的种群, 在形状、密度、强度和结构方面有很大差异<sup>[4]</sup>。当通过动能撞击偏转技术改变小行星轨道时, 小行星物质属性通常是未知的<sup>[5]</sup>。因此, 需要通过理论分析、试验和数值模拟, 分析撞击速度和小行星的物理特性对动量传递系数的影响规律, 降低动能撞击偏转小行星的风险和不确定性。

Gault等<sup>[6]</sup>通过超高速撞击试验获得了6.3 km/s撞击玄武岩的动量传递系数。Hoerth等<sup>[7]</sup>撞击不同孔隙率的岩石结果表明, 动量传递系数随着岩石孔隙率的增加而

降低。Chourey等<sup>[8]</sup>对多孔干砂、玻璃微球、月球风化层模拟物的撞击试验结果表明动量传递系数均随着撞击速度的增加而增加。George等<sup>[9]</sup>在美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)艾姆斯垂直靶场对各种陨石和陨石模拟物进行了一系列超高速碰撞试验, 结果表明含水陨石模拟物动量传递系数均显著大于同等孔隙度无水陨石的动量传递系数, 动量传递系数随着陨石孔隙率的增加而降低。受试验条件的限制, 试验速度大都低于6.5 km/s, 而且大部分超高速撞击试验缺乏对小行星模拟材料性能的完整描述。试验室模型试验通常不能直接重现动能撞击小行星表面所涉及的大撞击器尺寸和极高撞击速度<sup>[10]</sup>。数值模拟可有效弥补模型试验在尺寸和速度的不足, 得出大尺度和高速条件下的碰撞结果<sup>[11-12]</sup>。Raducan等<sup>[11]</sup>使用iSALE以双小行星重定向测试任务为例进行了2D数值模拟, 发现动量传递效率系数主要受材料初始孔隙度和内摩擦系数的影响。Rainey等<sup>[12]</sup>使用CTH模拟了DART撞击均质小行星模型, 分析了模型参数对动量传递效率系数、陨石坑直径和深度的影

收稿日期: 2023-04-07 修回日期: 2023-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(62227901, 12202068); 民用航天预研项目(D020304); 国家国防科技工业局空间碎片与近地小行星防御科研项目(KJSP2020020101)

响, 结果表明动量传递效率系数、陨石坑直径和深度主要由材料的强度和孔隙率决定, 但相关模拟未与试验结果比较, 验证模型参数的准确性。

因此, 本文首先开展球形铝弹丸撞击玄武岩靶试验, 获得不同撞击速度下成坑的结果和动量传递系数。利用AUTODYN软件光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 法进行数值模拟, 将模拟结果与实验室规模试验数据进行了比较, 验证了模型参数的准确性。在此基础上, 模拟了最高10 km/s撞击速度对抛射物质量、速度分布和动量传递系数的影响。结合试验和数值模拟结果, 获得动能撞击密实小行星的动量传递系数相似律, 揭示撞击速度对动量传递系数的影响规律。

## 1 超高速撞击分析

### 1.1 玄武岩靶

玄武岩经水钻钻取成棒材, 然后用磨床进行打磨得到如图1所示的圆柱靶, 尺寸 $\Phi 123.3 \text{ mm} \times 123.3 \text{ mm}$ , 同时制备了测量岩石力学特性的试验试件, 单轴压缩试验试件尺寸 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 巴西圆盘劈裂试验试件尺寸 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。在应变速率为 $1 \times 10^{-4} / \text{s}$ 的条件下, 采用单轴压缩和巴西圆盘试验测定了试件的抗压和抗拉强度。测得玄武岩单轴抗压和抗拉强度的平均值分别为146.0 MPa和9.8 MPa。通过测量抗拉试件质量和体积, 得到玄武岩的密度 $2.876 \text{ g/cm}^3$ 。

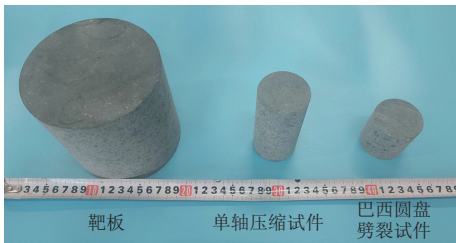


图1 玄武岩靶和试件  
Fig. 1 Basalt targets and specimens

为直接测量撞击玄武岩的动量传递系数, 玄武岩靶被挂在2根42 cm的尼龙绳上, 悬挂在靶室中央, 形成弹道摆。为防止岩石材料在受高速撞击时崩落破坏, 在玄武岩的侧面缠绕几圈玻璃纤维增强塑料胶布, 如图2所示。

### 1.2 弹丸和弹托

试验采用如图3(a)所示的直径为6 mm球形2024铝合金弹丸, 用聚碳酸酯弹托发射, 弹托强制分离系统将弹丸与弹托分离, 然后用磁测速测量弹丸速度<sup>[3]</sup>。为测量无弹丸情况下弹托的速度, 将弹托切分为上下

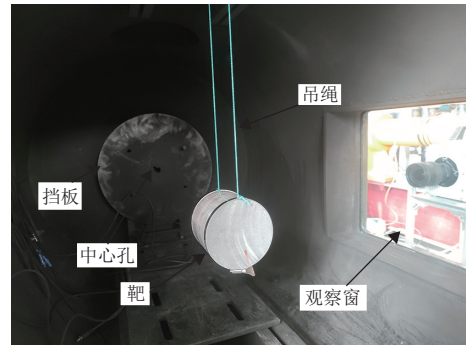
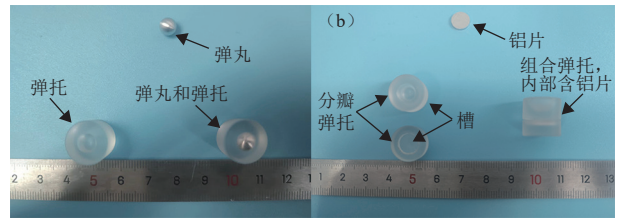


图2 双吊绳弹道摆  
Fig. 2 Double rope pendulum



(a) 弹丸和弹托 (b) 无弹丸弹托

图3 弹丸和弹托  
Fig. 3 Projectile and sabot

两瓣, 弹托中心开槽, 槽内放置一块铝片后, 将分瓣弹托组合在一起, 形成内部包含铝片的弹托。弹托内部铝片用于触发磁测速, 测量无弹丸情况下弹托的速度, 如图3(b)所示。

### 1.3 试验系统和装置

试验加载系统如图4所示, 二级轻气炮加速弹丸和弹托, 弹丸和弹托出炮口后, 用弹托分离器将弹丸与弹托分离<sup>[14]</sup>, 通过磁测速获得弹丸速度信号。为测量无弹丸情况下的弹托速度, 将磁测速装置安装在弹托分离器前面, 弹托首先通过磁测速装置, 弹托内铝片触发磁测速, 获得弹托速度信号。速度信号触发高速摄像, 高速摄像记录弹道摆的整个摆动过程。高速摄像的拍摄帧率为1万帧/s, 靶室内高速摄像机的对面设置了1个LED灯补光。靶室内环境的空气压力保持在100 Pa左右。当弹丸碰撞靶板后, 轻气炮高压气室中的氮气和一级段泵管中的氢气会尾随弹丸进入靶室。为最大限度地减小轻气炮发射气体对目标的影响, 在二级发射管与靶室间放置了一个圆形挡板, 挡板中心开一个直径20 mm的圆孔, 一方面可减小轻气炮发射气体对目标动量的影响; 另一方面可减少进入靶室的黑烟, 影响高速摄像的拍摄。

### 1.4 动量传递系数的计算和误差分析

#### 1.4.1 计算方法

从高速摄像记录弹道摆运动过程图中找出弹道摆的初始位置和最大位置处如图5所示, 将2幅图片导入



### 1.5 结果分析

不同撞击速度下成坑直径、深度和动量传递系数如表1所示。撞击速度从2.3 km/s增加到3.9 km/s,  $\beta$ 从1.96增加到2.51。不同撞击速度下, 弹丸撞击玄武岩靶成坑形貌基本一致。6 mm弹丸以3.9 km/s撞击玄武岩典型成坑结果如图7所示。玄武岩靶上形成的空腔由一个碗状中心小坑(图7中白色虚线圈内)和一片较大的浅层剥落区(图7中白色和红色虚线圈内)组成, 与之前超高速撞击致密岩石成坑形貌一致<sup>[7]</sup>。碗状的中心坑是由冲击开挖流产生的, 浅层剥落区是冲击波与稀疏波在自由表面的相互作用导致材料发生拉伸破坏形成的<sup>[15]</sup>。

表 1 超高速撞击条件下的试验参数及结果

Table 1 Experimental parameters in hypervelocity impact conditions and results

序号	$m_p/g$	$U/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$M/g$	$m_{\text{ejecta}}$	$x_{\text{max}}$ 或 $x_{\text{bd}}/\text{cm}$	$\beta$	$D/\text{mm}$	$P/\text{mm}$
1	0.31	2.30	4359.4	13.3	8.22	1.96	42	10.0
2	0.31	3.47	4355.6	33.3	13.60	2.39	52	12.0
3	0.31	3.90	4252.8	32.8	15.75	2.51	55	13.5
4	0.00	2.55	4388.2	—	1.57	—	—	—
5	0.00	3.51	4388.9	—	1.62	—	—	—
6	0.00	3.91	4385.6	—	1.70	—	—	—

注:  $p$ 为成坑深度;  $D$ 为成坑直径;  $m_{\text{ejecta}}$ 为抛射物质量。

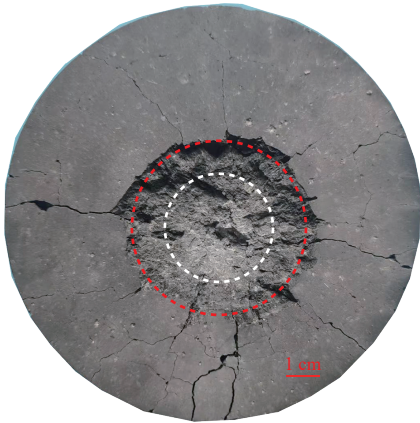


图 7 撞击速度为3.9 km/s时, 玄武岩的成坑结果

Fig. 7 Craters formed in basalt, with impact velocity of 3.9 km/s

## 2 数值模型

### 2.1 算法及模型

AUTODYN软件与其它仿真软件在计算陨石坑大小、撞击过程中峰值压力和动量增强系数大小进行了基准比较<sup>[16-18]</sup>, 广泛用于模拟动能侵彻、空间碎片防护、陨石成坑等超高速撞击问题<sup>[19-22]</sup>。动能撞击偏转小行星涉及超高速和大变形的成坑过程, 相对于基于网格的方法, SPH模拟超高速撞击成坑问题不但可以避免网格畸变, 而且可以追踪在陨石坑形成过程中抛射

出的粒子质量和速度。基于AUTODYN软件二次开发功能, 可以导出所有SPH粒子在不同时间的空间位置、质量和速度信息。根据所有抛射物的质量和速度信息, 将撞击方向上产生的所有抛射物粒子动量分量相加, 动量传递系数 $\beta-1$ 等于抛射物在撞击方向上的总动量除以抛射物初始动量<sup>[23]</sup>。

利用AUTODYN软件建立二维轴对称模型进行数值计算如图8所示, 球形弹丸直径6 mm, 采用航天器常用材料Al2024。靶厚度和直径均为123.3 mm的玄武岩, 弹丸半径20个粒子, SPH粒子大小为0.15 mm<sup>[16]</sup>。

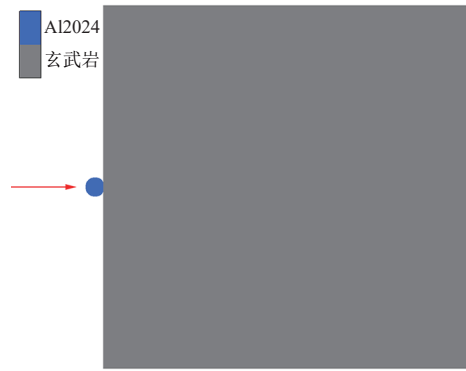


图 8 简化计算模型

Fig. 8 Simplified calculation model

### 2.2 材料模型及参数

Al2024采用Shock状态方程、Johnson-Cook强度模型和最大拉应力失效, 失效力取2.6 GPa<sup>[24]</sup>, 材料参数来自AUTODYN材料库, 具体材料参数见表2和表3。

表 2 Al2024和玄武岩的Shock状态方程参数<sup>[19, 25]</sup>

Table 2 Parameters of shock for Al 2024-T4 and basalt

材料	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$s_1$	$\gamma$
Al-2024	2.785	5 328	1.338	2
玄武岩	2.876	2 400	1.600	1

表 3 Al-2024 的Johnson-Cook本构模型和失效参数<sup>[26]</sup>

Table 3 The Johnson-Cook model and failure parameters for Al-2024

材料	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$c$	$m$	$T_m/\text{K}$	$T_f/\text{K}$
Al-2024	265	426	0.019	0.34	0.4	935	300

玄武岩采用Shock状态方程, 玄武岩采用Drucker-Prager强度模型, 模型考虑了屈服强度 $Y$ 与静水压力 $P$ 之间的线性关系。

$$Y = Y_0 + f \times P \quad (6)$$

玄武岩初始屈服强度 $Y_0$ 取146 MPa, 摩擦系数 $f$ 取0.6<sup>[11]</sup>, 玄武岩采用最大拉应力失效, 失效力取50 MPa<sup>[27]</sup>。

### 2.3 计算结果与试验结果比较

6 mm铝弹丸3.9 km/s速度撞击玄武岩的成坑结果如图9所示。从0.05~0.2 ms成坑深度不变,表明开坑完成。撞击0.2 ms后,层裂碎片与靶完全分离,速度不会再发生改变。层裂碎片速度较低,完全离开靶板表面需要较长,可根据导出的SPH粒子空间位置、质量和速度信息,计算反溅抛射物和层裂碎片的动量。因此,为节约计算时间,取不同撞击速度下撞击0.2 ms后,计算反溅抛射物和层裂碎片的动量。

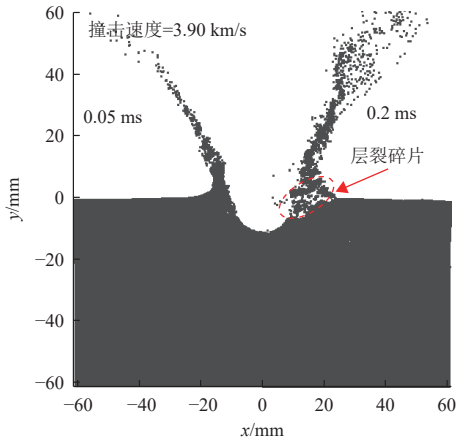
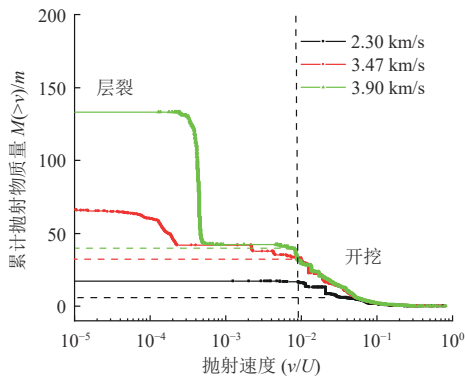


图9 撞击后成坑结果,左0.05 ms,右0.2 ms

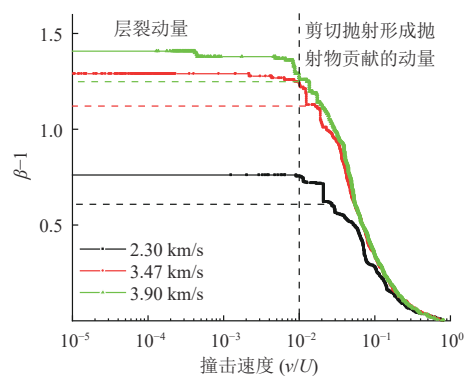
Fig. 9 Crater results, left 0.05 ms, right 0.2 ms

撞击后0.2 ms不同撞击速度形成的抛射物的质量-速度分布如图10所示。对抛射物质量-速度分布曲线积分,得到抛射物累积动量 $P_1$ ,动量传递系数

$\beta - 1 = P_1/mU$ 。水平横线上是层裂碎片的质量和动量,层裂大大提高了抛射物的质量,如图10(a)所示。但层裂碎片速度较低,贡献动量较小如图10(b)所示。在不同速度下,使用AUTODYN模拟预测的陨石坑直径和深度分别与试验相差4.7%~10.9%和3.7%~8%。数值模拟得到的动量传递系数与试验的最大误差为10.2%。通过与不同速度的试验结果对比,验证了动量传递系数的统计方法、所选算法和模型参数的合理性。在此基础上,模拟了5~10 km/s这4种不同撞击速度撞击玄武岩靶,研究撞击速度对抛射物质量、速度分布和动量传递系数的影响,结果如表4所示。随着撞击速度提高,弹丸和靶板可能会发生融化和气化,Shock状态方程不能直接计算得到温度或焓,只能间接估算,因此本文未考虑融化和气化对抛射物产生和质量-速度分布的影响。之前的数值模拟结果表明,在10 km/s以下,弹丸和靶板发生融化和气化的比例较低,Shock状态方程是适用的<sup>[27-28]</sup>。但在更高速度的情况下,需考虑熔化和气化问题,选择可以描述物质的凝聚态(固液)、膨胀态(气)和混合态的状态方程<sup>[29]</sup>,研究融化和气化产物对动量传递的影响。为防止高速下靶板被撞碎,将靶板尺寸扩大1倍。当陨石坑直径达到几米时,在陨石坑表面形成大面积的损伤,损伤区域的抛射物无法获得足够的速度离开小行星表面<sup>[30]</sup>。因此,将小型试验和模拟结果外推到小行星尺度需要修改试验和模拟结果,去除层裂机制产生的抛射物对动量传递的贡献。



(a) 速度大于 $v/U$ 无量纲抛射物质量 $M(>v)/m$ 的分布



(b)  $\beta-1$ 对无量纲抛射物速度 $v/U$ 的依赖关系

图10 不同速度下的抛射物的质量和速度分布

Fig. 10 Mass-velocity distribution of ejecta at different velocities

表4 数值模拟与试验结果的比较

Table 4 Comparison between numerical simulation and experimental results

速度/ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	成坑直径/mm			成坑深度/mm			$\beta$		
	试验	模拟	误差	试验	模拟	误差	试验	模拟	误差
2.30	42	44	4.7%	10	9.2	8.0%	1.96	1.76	14%
3.47	52	48	7.7%	12	11.2	6.7%	2.39	2.29	4.2%
3.90	55	49	10.9%	13.5	14	3.7%	2.51	2.41	3.9%

### 2.4 数值计算结果及分析

#### 2.4.1 抛射物的质量与速度分布规律

速度大于 $v$ 的累积抛射物质量 $M(>v)$ 分布曲线如图11所示,抛射物的速度逐渐变小,抛射物累计质量分布趋于平缓,接近抛射物质的总质量。不同撞击速度下累积抛射物质量 $M(>v)$ 分布规律相似,撞击速

度越大, 喷射物的累计质量越大。撞击速度从 5 km/s 增加到 10 km/s,  $\beta-1$  从 1.64 增加到 2.72 (见表 5)。喷射物的质-速度分布函数可简化为幂律分布<sup>[10]</sup>, 图 11 中黑色直线斜率等于  $-3\mu$ ,  $\mu$  是耦合参数, 黑色直线斜率等于  $-1.65$ 。

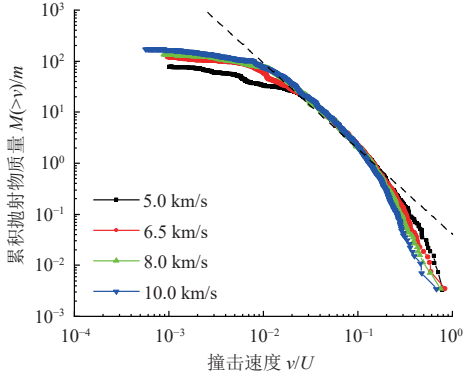


图 11 速度大于  $v$  喷射物的质量  $M(v)$  分布规律  
Fig. 11 Distribution of ejecta with velocity over  $v$

表 5 动量传递系数的相似律模型计算和模拟结果

Table 5 Scaling law model and simulation results of momentum enhancement factor  $\beta$

撞击速度/ (km·s <sup>-1</sup> )	$\beta$		相对误差/ %
	相似律	模拟值	
5	2.82	2.64	6.8
6.5	3.16	3.13	1.0
8	3.47	3.37	2.9
10	3.86	3.58	5.0

### 2.4.2 动量传递相似律

相似律模型广泛用于将试验室尺度的试验和模拟结果外延至行星级别, 强度区间的动量相似律<sup>[10]</sup>为

$$\beta - 1 = K_s K_{vs} \left( \frac{n}{\sqrt{2}(n-1)} \right) \left[ \left( \frac{U}{\sqrt{Y/\rho}} \right)^{3\mu-1} \left( \frac{\rho}{\delta} \right)^{1-3\nu} \right] \quad (7)$$

其中:  $\delta$ 、 $U$ 、 $Y$ 、 $\rho$  分别为弹丸密度、撞击速度、靶强度和密度;  $\nu$  为耦合参数;  $n = 3\mu$ ;  $K_s$ 、 $K_{vs}$  为材料相关的常数。

$$K_s = \frac{M_e}{m} \left( \frac{U}{\sqrt{Y/\rho}} \right)^{-3\mu} \left( \frac{\rho}{\delta} \right)^{3\nu-1} \quad (8)$$

$$K_{vs} = v^* / \sqrt{Y/\rho} \quad (9)$$

其中:  $m$  为弹丸质量;  $M_e$  为速度大于  $v$  的喷射物质量;  $v^*$  为喷射物的最小速度。

速度大于  $v$  的喷射物质量如图 12 所示, 玄武岩动量相似关系常数  $K_s = 0.29$ ,  $K_{vs} = 0.47$ 。将弹丸和靶板的参数带入到式 (7), 得到撞击密实小行星的动量传递

曲线 ( $U$  单位 km/s):

$$\beta = 1 + 0.007 2U^{0.65} \quad (10)$$

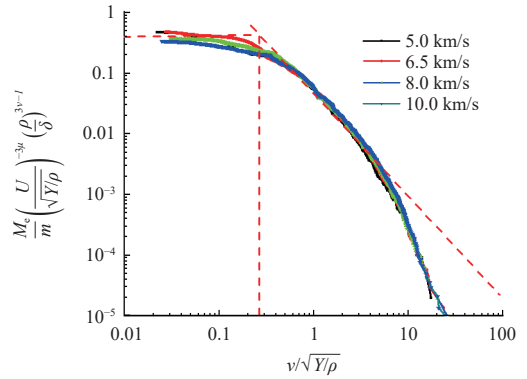


图 12 速度大于  $v$  的喷射物质量  
Fig. 12 Mass with ejection velocity  $v$

在 10 km/s 撞击速度范围内模拟的结果 (图 13) 和相似律结果的最大误差在 10% 之间 (见表 5)。因此, 在 10 km/s 以内的速度范围内, 动量增强系数  $\beta$  随撞击速度的 0.65 次方的增大而增大, 相律模型可以很好地预测动量增强系数。

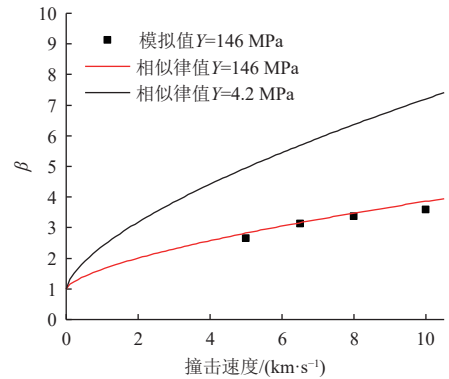


图 13 密实小行星动量增强系数  $\beta$  与撞击速度的关系  
Fig. 13 Relationship between momentum enhancement factor  $\beta$  and impact velocity

根据威布尔理论, 脆性岩石的强度  $Y$  随着其质量长度  $x_{\max}$  的增大而减小,  $Y = Y_0(L_0/L)^{1/i}$ , 其中  $i$  通常为 2~3<sup>[31]</sup>, 靶板质量长度为  $L_0$  时靶板强度大小为  $Y_0$ 。将实验室靶板质量长度  $L_0$  外推至近地小天体大小, 需要考虑岩石强度的变化。因此, 考虑近地小天体尺寸的动量传递因子  $\beta$  为

$$\beta - 1 = (\beta_0 - 1) \left( \frac{L}{L_0} \right)^{\frac{3\mu-1}{2i}} \quad (11)$$

其中:  $\beta_0$  为试验室条件下动量传递系数的大小, 由式 (11) 可知, 对于  $\mu = 0.55$ ,  $i = 2$ ,  $\beta - 1$  随近地小天体尺

寸的0.16次方增大而增大。将实验室岩石的尺寸12 cm增加到140 m, 近地小天体岩石的强度从146.0 MPa降低到4.2 MPa, 则撞击140 m密实小行星的动量传递曲线(见图13)( $U$ 单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )为

$$\beta = 1 + 0.015 6U^{0.65} \quad (12)$$

### 3 结 论

本文利用二级轻气炮进行了6 mm铝弹丸以2~4 km/s超高速撞击玄武岩靶试验, 获得了在不同速度下撞击玄武岩的动量传递系数。将模拟结果和试验结果进行了比较, 验证了计算模型和参数的准确性。模拟和相似律模型结果均表明, 密实小行星的动量增强系数明显依赖撞击速度。撞击岩石目标数值模拟结果与相似律模型计算结果吻合较好, 相似律模型可以很好地预测动量增强结果, 在10 km/s以内的速度范围内, 动量增强系数 $\beta$ 随撞击速度的0.65次方的增大而增大。

### 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] DEARBORN D S P, BRUCK SYAL M, 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.
- [3] DALY R T, ERNST C M, BARNOUIN O S, et al. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defense[J]. *Nature*, 2023, 616: 443-447.
- [4] PELTON J N, ALLAHDADI F. Handbook of cosmic hazards and planetary defense[M]. London: Springer, 2015.
- [5] SUGIMOTO Y, RADICE G, CERIOTTI M. Hazardous near Earth asteroid mitigation campaign planning based on uncertain information on fundamental asteroid characteristics[J]. *Acta Astronautica*, 2014(103): 333-357.
- [6] GAULT D E, SHOEMAKER M E, MOORE H J. Spray ejected from the lunar surface by meteoroid impact[R]. Moffett Field, Calif: Ames Research Center, 1963.
- [7] HOERTH T, SCHÄFER F, HUPFER J, et al. Momentum transfer in hypervelocity impact experiments on rock targets[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 103: 197-204.
- [8] CHOUREY S, KOSCHNY D, ROTT M, et al. Determining the momentum transfer in regolith-like targets using the TUM/LRT electrothermal accelerator[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 194: 105112.
- [9] FLYNN G J, DURDA D D, MOLESKY M J, et al. Momentum transfer in hypervelocity cratering of meteorites and meteorite analogs: implications for orbital evolution and kinetic impact deflection of asteroids[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 136: 103437.
- [10] HOLSAPPLE K A, HOUSEN K R. Momentum transfer in asteroid impacts. I. theory and scaling[J]. *Icarus*, 2012, 221(2): 875-887.
- [11] 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.
- [12] RAINEY E S G, STICKLE A M, CHENG A F, et al. Impact modeling for the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 142: 103528.
- [13] 施尚春, 陈攀森, 黄跃. 高速弹丸的磁感应测速方法[J]. *高压物理学报*, 1991, 5(3): 205-214.
- [14] SHI S C, CHEN P S, HUANG Y. Velocity measurement of magnet induced system for projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1991, 5(3): 205-214.
- [15] 唐恩凌, 李志秋. 二级轻气炮中组合式弹托分离器的应用[J]. *沈阳理工大学学报*, 2012, 31(1): 84-87.
- [16] TANG E L, LI Z Q. The application of combined type dissociator of projectile from its seat in two-stage light gas gun [J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2012, 31(1): 84-87.
- [17] POELCHAU M H, KENKMANN T, HOERTH T, et al. Impact cratering experiments into quartzite, sandstone and tuff: the effects of projectile size and target properties on spallation[J]. *Icarus*, 2014, 242: 211-224.
- [18] STICKLE A M, SYAL M B, CHENG A F, et al. Benchmarking impact hydrocodes in the strength regime: implications for modeling deflection by a kinetic impactor[J]. *Icarus*, 2020(338): 113446.
- [19] SUETSUGU R, TANAKA H, KOBAYASHI H, et al. Collisional disruption of planetesimals in the gravity regime with iSALE code: comparison with SPH code for purely hydrodynamic bodies[J]. *Icarus*, 2018, 314: 121-132.
- [20] PIERAZZO E, ARTEMIEVA N, ASPHAUG E, et al. Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: impacts on strengthless and metal targets[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2008, 43(12): 1917-1938.
- [21] REN S, ZHANG Q, GAO F, et al. Impact resistance mechanism of reactive material bumper for spacecraft whipple shield: experiments and numerical simulations[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 126: 107646.
- [22] LU Y Y, ZHANG Q M, XUE Y J, et al. Hypervelocity penetration of concrete targets with long-rod steel projectiles: experimental and theoretical analysis[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148: 103742.
- [23] SAITO T, KAIHO K, ABE A, et al. Hypervelocity impact of asteroid/comet on the oceanic crust of the earth[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1770-1777.
- [24] SAITO T, KAIHO K, ABE A, et al. Numerical simulations of hypervelocity impact of asteroid/comet on the Earth[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1-12): 713-722.
- [25] SYAL B, J O M, MILLER P L. Deflection by kinetic impact: sensitivity to asteroid properties[J]. *Icarus*, 2016, 269: 50-61.
- [26] 邸德宁, 陈小伟. 碎片云SPH方法数值模拟中的材料失效模型[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 948-956.
- [27] DI D N, CHEN X W. Material failure models in SPH simulation of debris cloud[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 948-956.
- [28] AHRENS T J, JOHNSON M L. Shock wave data for rocks[M]. Washington, DC. : American Geophysical Union, 1995, 35-44.

- [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 Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, The Netherlands: [s. n.], 1983.
- [27] WALKER J D, CHOCRON S. Momentum enhancement in hypervelocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(6): 1-7.
- [28] RADUCAN S D, JUTZI M, DAVISON T M, et al. Influence of the projectile geometry on the momentum transfer from a kinetic impactor and implications for the DART mission[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 162: 104147.
- [29] WÜNNEMANN K, COLLINS G S, OSINSKI G R. Numerical modelling of impact melt production in porous rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 269(3-4): 530-539.
- [30] LUTHER R, ZHU M, COLLINS G, et al. Effect of target properties and impact velocity on ejection dynamics and ejecta deposition[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 53(8): 1705-1732.
- [31] HOLSAPPLE K A. On the "strength" of the small bodies of the solar system: a review of strength theories and their implementation for analyses of impact disruptions[J]. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(2): 127-141.

作者简介:

刘文近(1993-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 近地小天体防御方面的研究。

通信地址: 北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学(100081)

E-mail: lwj931@163.com

张庆明(1963-): 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 超高速冲击动力学。本文通信作者。

通信地址: 北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学(100081)

电话: (010)68915837

E-mail: qmzhang@bit.edu.cn

## Momentum Transfer Law of Hypervelocity Kinetic Impacting Dense Asteroids

LIU Wenjin<sup>1</sup>, ZHANG Qingming<sup>1</sup>, LONG Renrong<sup>1</sup>, GONG Zizheng<sup>2</sup>, REN Jiankang<sup>1</sup>, REN Siyuan<sup>2</sup>,  
WU Qiang<sup>2</sup>, Song Guangming<sup>2</sup>, CHEN Chuan<sup>2</sup>, ZHANG Pinliang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Kinetic impact is considered an effective way to deflect potentially hazardous asteroids from a collision with Earth. To study the effect of impact velocity on the momentum transfer coefficient, 6 mm aluminum projectile was used to impact the basalt target at 2~4 km/s. By comparing the computation results of aluminum sphere impact on basalt with the experimental results, the correctness of the calculation and the statistical method of momentum transfer coefficient was verified. The simulation results show that the mass and velocity distributions of projectiles at different impact velocities were almost the same. The greater the impact velocity, the greater the cumulative mass of projectiles. Combing with the experimental and numerical simulation results, the momentum transfer coefficient similarity law of kinetic impacting asteroids was obtained. The momentum enhancement coefficient of the dense asteroid increases with the increased of the impact velocity to the power of 0.65. The momentum transfer similarity law can provide data support for the kinetic impact deflection of asteroids.

**Keywords:** hypervelocity impact; scaling law; planetary defense; numerical simulation

### Highlights:

- The momentum transfer coefficients of the aluminum projectile impacting the basalt target at different impact velocities are obtained.
- The simulation results indicate that our code can produce results that closely resemble the hypervelocity experiment, and the model and the selection of material parameters can be used to study the formation mechanism of crater and ejecta.
- Combing with the experimental and numerical simulation results, the momentum transfer coefficient similarity law of kinetic impacting asteroids is obtained.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]