



# 小天体接触探测颗粒动力学研究进展

程彬<sup>1</sup>, 于洋<sup>2</sup>, 宝音贺西<sup>1\*</sup>

1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084;

2. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191

\* E-mail: baoyin@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2021-04-20; 接受日期: 2021-05-31; 网络版发表日期: 2021-10-22

国家重点研发计划(编号: 2019YFA0706500)资助项目

**摘要** 深空探测承载了人类对宇宙奥秘的孜孜追寻, 而小天体是其中不可或缺的重要目标, 对于探索行星形成、寻找生命起源、防御其撞击地球以及空间资源开发利用等具有重要的科学意义. 本文意识到小天体接触探测热潮已经悄然来临, 首先回顾了各大航天机构已实施的多次小天体任务, 然后分析了弱引力环境下小天体地表颗粒层给接触探测带来的挑战和风险, 阐释了小天体接触探测颗粒动力学问题的基本特点与科学价值; 进一步详细介绍了探测器表层操作中以及空间作用下颗粒风化层的多尺度动力学行为相关的研究进展; 最后, 展望了该研究方向的未来发展趋势.

**关键词** 小天体, 风化层, 颗粒动力学, 深空探测, 接触附着

## 1 引言

古往今来, 人类世代思考我们作为人类能够提出的最深邃的问题: 我们从何而来? 我们将往何处? 宇宙中我们是否孤独? 人类的存在只是太阳系45.7亿年历史中的短短一瞬, 无论先贤们曾给出了多少种答案, 可以肯定的是, 我们只有将目光走出地球, 放眼宇宙才能获得更为广阔的视角. 虽然万有引力将人类牢牢地束缚在地球上, 但值得庆幸的是, 我们还有一扇通往宇宙深处的窗口, 一个壮丽而震撼的星空. 深邃的宇宙如同有着魔力一般, 不分民族、地域或时间, 驱使着旅行者们开疆拓土. 美国天文学家卡尔·萨根在《暗淡蓝点》中引述赫尔曼·梅尔维尔的诗句道出了所有

向往星空者的心声, “远方引我心痒难耐, 念念不忘, 我渴望驶向未知的大海.”

响应着地球之外星辰的召唤, 我们的祖先抬头仰望, 肉眼所能识别的五大行星的明亮身影在星空中穿行, 偶尔伴随着拖着长长尾巴又来来去去的彗星. 1609年, 伽利略将望远镜指向天空, 开启了现代天文学的时代, 通过这双视野更为深远的眼睛, 人类发现了在太阳系深处位置变化不明显的暗淡星点——天王星. 而后, 行星运动理论的发展使得观测的眼睛更为精准, 1846年, 牛顿力学迎来了最辉煌的时刻, 人类计算预测出遥远海王星的存在. 至此, 我们似乎已经掌握了太阳系的构造——八个围绕太阳运行的孤独行星, “太阳系大厦几近落成, 所剩只是一些修饰工作”, 但这看

引用格式: 程彬, 于洋, 宝音贺西. 小天体接触探测颗粒动力学研究进展. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1299-1314

Cheng B, Yu Y, Baoyin H X. Recent advances in granular dynamics for small-body touchdown missions (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1299-1314, doi: 10.1360/SST-2021-0169

似牢固的屋顶上仍盘踞着一朵貌似不起眼的乌云——一群漂浮在行星之间的太空碎石。

自从19世纪初意大利天文学家Piazzi发现第一颗小行星1 Ceres以来,随着天文观测水平的提高,人们发现了太阳系遍布众多尺寸较小的太空石块,迄今已确认的小行星数量超过100万,而这很可能仍仅是所有小天体中的一小部分。面对这些望远镜里的暗弱星点,人们只能望洋兴叹,对其所知甚少,但隐约感到数量如此庞大的天体族必然包含丰富的信息。所幸,技术的进一步发展让人类的感知通过深空探测直接延伸到地球之外,小天体不再只是望远镜中的暗淡光点,而是具有大小、形状、光谱、地貌的鲜活世界,每一个看似普通的太空碎石都与太阳系的诞生与演化紧密相连。一切正如Binzel团队<sup>[1]</sup>的预测,“我们即将进入小天体研究的新纪元”。

在小天体探测即将迎来新阶段的起点上,本文回顾了各大航天机构已实施的多次小天体任务,重点分析了之前接触操作中所出现的难题,论述了弱引力环境下小天体地表颗粒层给接触探测带来的挑战和风险。在此基础上,梳理了近二十年来人们对小天体接触探测涉及的颗粒动力学问题的认识与发展,评述了对该问题进行多尺度研究的必要性与研究方法,为相关领域的研究者们提供参考。

## 2 小天体接触探测

### 2.1 弱引力小天体

太阳系的弱引力小天体包括小行星、彗星、行星的小卫星以及海王星外小天体等,形状不规则、引力微弱、表面地形地貌复杂是它们的共同特征。正如美国宇航局行星科学部的宣言,“伟大问题的答案也存在于微小之间”,这些漂浮在太阳系内看似普通的太空碎石,讲述了原初时期宇宙尘埃的碰撞生长、巨行星大迁徙导致的短暂动荡、太阳系进入稳态后的缓慢演变等丰富故事。从结束恐龙统治的小行星,到富含水冰的彗星,再到与行星相伴相生的小卫星,以及太阳系边缘的海外小天体,它们中的每一个都埋藏了史诗级的线索,足以改变我们对诸多自然科学基本问题乃至人类文明走向的认识。

(1) 现代天体物理学普遍认为太阳系是由45.7亿年前行星盘时期的尘埃粒子塌缩吸积而成,其中大部

分物质碰撞合并为大行星,而部分散落的“边角料”由于轨道扰动等因素没有被行星全部吞并,这些物质以原始形态与行星一起经历了亿万年留存至今<sup>[2]</sup>。大行星上大气侵蚀与板块运动等复杂演化过程抹去了其上绝大部分太阳系形成初期的痕迹,而小天体自身的演化程度相对较低,仍比较完整地保留了太阳系早期的条件和状态信息,这些古老的“时间胶囊”将为我们打开太阳系尘封历史的窗口,是追踪行星形成乃至太阳系起源的关键。

(2) 化学和天文学证据表明太阳系内层行星(即类地行星)形成较早,内部强大的放射性衰变和恒星风会使其被加热、蒸干,无法存在含水矿物相<sup>[3]</sup>,因而远古地球应是干涸、荒凉的星球,但这里却是迄今我们唯一所知诞生生命的地方。小天体却走上了截然不同的演化路径,光谱数据与采样分析表明它们富含有机物质和水分子这两种我们所知的生命的必须元素<sup>[4,5]</sup>,因此,一个可能的解释是木星大迁徙时期,大量小天体被引力抛射入太阳系内侧,由此将水、碳基物质等生命元素输送至地球,因而研究小天体是找寻地球有机生命体起源的关键一环。

(3) 1994年一颗直径约为2 km的彗星Shoemaker-Levy 9被木星引力捕获,随后被撕扯解体,最终落入木星大气,哈勃太空望远镜随即捕捉到撞击在木星上形成了地球大小的巨型疤痕<sup>[6]</sup>,这不禁使人们担心同处太阳系的地球未来的命运,6500万年前,恐龙在面对小行星撞击时束手无策,而我们作为掌握科学技术的智人,必须在可能的灾难性事件发生前对“地球杀手”小天体有更深入的了解。

(4) 基于陆地储备估计,人类将在50年左右耗尽某些用于现代工业的关键元素,而小天体上拥有丰富的贵金属矿藏可开采到地球用于生产,如一个直径500 m的小行星就可能含有地球总储量1.5倍的铂族贵金属<sup>[7]</sup>,除此之外,小天体还可作为未来星际航行的中转站,用以补充水和燃料。开发利用小天体资源将使人类突破地球的局限,作为新的工程设想受到了广泛关注,这将是人类真正走向星际文明的关键。

### 2.2 小天体接触探测任务

人类最早获得小天体清晰地形地貌信息要归功于1971年的火星尘暴,席卷火星表面的沙尘让初到火星轨道的Mariner 9号探测器无法顺利执行地表观测,于

是临时转而执行新任务, 拍摄了其卫星Phobos和Deimos的照片. 彼时, 还未有专门的小天体探测任务, 多为其他天体探测任务在飞行过程或扩展阶段的远距离飞越.

20世纪90年代开始, 伴随世界范围内第二轮深空探测热潮的兴起, 人们已经清楚认识到了小天体探测对诸多重大科学与工程问题的重要性, 美国宇航局(NASA)、日本宇航局(JAXA)、欧洲空间局(ESA)以及中国国家航天局(CNSA)纷纷将小天体探测提高到战略地位, 小天体已逐渐成为科学探测的重点目标. 其中, 2005年, ESA在《宇宙愿景2015~2025》中明确了小天体为重点研究方向, 而美国国家研究委员会在2012年于《2013~2022行星科学十年愿景》中将小天体探测设为关键环节, 我国也在《2016中国的航天》中将小天体接触探测列入了未来规划之中. 表1统计了目前已经完成和即将实施的代表性小天体探测任务<sup>[8~36]</sup>. 历经几十年的发展, 小天体探测方式由初期仅惊鸿一瞥的近距离飞越(如ICE探测器), 发展到实施长期观测的环绕飞行(如NEAR Shoemaker探测器), 再到探测器短暂接触或附着于小天体表面的接触探测(如Hayabusa探测器), 探测目标涵盖近地小行星、主带小行星、彗星、火星卫星、土星卫星、柯伊伯带小天体等不同类型的小天体. 值得一提的是, 2012年12月, 我国的嫦娥二号月球探测器在圆满完成探月任务之后, 成功近距离飞越了近地小行星4179 Toutatis, 在国际上首次获取了Toutatis的地形地貌, 实现了我国在小天体探测领域零的突破<sup>[8]</sup>.

从表1中可看出, 除了当前两个小天体接触探测任务正处于活跃状态外, 在接下来的10年, 还将有至少8次专门的小天体探测任务探访13颗不同的小天体, 其中4次均涉及接触探测, 并且我国的小行星、彗星采样返回任务规划中也包含了接触探测的操作. 可以判断, 小天体接触探测的热潮已经悄然来临, 因此, 我们有必要回顾之前多次小天体接触探测任务的得失, 为后续的探测任务指明方向, 在此选择首次实现小行星附着与采样返回的Hayabusa任务、彗星着陆的Rosetta任务以及目前正在开展的ORISIS-REx小行星采样任务.

### 2.2.1 Hayabusa

日本的Hayabusa号探测器于2003年5月发射, 2005

年6月飞抵小行星25143 Itokawa, 随后开展了一系列接触探测操作. 11月, Hayabusa号在离Itokawa表面44 m上空释放了小型巡视器MINERVA, 但后者却飘离预计轨道而未能成功着陆, 事故分析表明, 可能是对该小行星引力场的估计误差所导致的轨道偏差<sup>[37]</sup>. 而在之后的接触采样操作中, 厄运再次降临. 探测器原计划在小行星表面短暂接触并进行射弹采样, 然而, 由于弱引力下小天体表面颗粒物质与探测器的接触动力学作用并不清楚, 采样头接触Itokawa后未能触发弹丸发射操作, 探测器在两次弹跳过后发生倾倒, 导致第一次采样任务失败; 第二次采样流程较为顺利, 但却在附着前误触发安全模式, 难以确定是否成功采样, 任务组只能寄希望于探测器本体着陆产生的冲击也能激起部分尘埃进入样品收集仓<sup>[38]</sup>. Hayabusa返回舱回收后, JAXA宣布仅收集了1534粒微米量级的尘埃, 远低于任务预期<sup>[19]</sup>.

尽管Hayabusa任务在诸多环节上不尽如人意, 但仍在科学与工程意义上取得了重大突破, 确认了小天体疏松多孔的“碎石堆”结构, 实现了国际首次小行星附着与采样返回. 值得一提的是, Hayabusa号的继承者, Hayabusa2号探测器, 在吸取了前任的经验后目前表现良好, 已经成功实施了表面探测、撞击和采样任务, 并正在执行后续的十年期扩展任务.

### 2.2.2 Rosetta

欧空局登陆彗星的Rosetta任务在2004年3月发射, 历经10年的长途跋涉, 于2014年8月成功交会目标67P/Churyumov-Gerasimenko彗星. 11月12日, 着陆器Philae从探测器分离, 计划通过所携带锚定装置固定在67P表面, 但由于对彗星表面由颗粒物质组成的崎岖地貌的接触动力学行为认识不足, 着陆器意外地以38 cm/s的速度快速反弹, 上升至离67P表面约1 km处开始下降, 随后再次以3 cm/s的速度反弹, 这两次意外弹跳使得Philae最终未能落在预定着陆区, 而是卡在一处楔形峭壁的阴影里, 不久因能源不足处于永久的休眠状态<sup>[22]</sup>.

尽管Philae着陆器未能按计划开展彗星表面科学研究, Rosetta母船仍不辱使命, 获得了很多新的发现, 确认了彗星存在磷和甘氨酸等有机化合物, 明晰了其内部的高孔隙率结构, 在与67P彗星的接近两年的伴飞中, 让人类首次有机会清楚地观察到彗星在近日点

表 1 代表性小天体探测任务

Table 1 Well-know small body exploration missions

任务名称	发射时间	机构	任务简述
Mariner 9	1971	NASA	在执行火星环绕任务期间, 拍摄了火卫一Phobos和火卫二Deimos, 是人类首次对小天体进行近距离成像 <sup>[9]</sup>
Viking 1	1975	NASA	在完成火星观测任务后, 近距离飞越了其卫星Phobos <sup>[10]</sup>
ICE	1978	NASA, ESA	在执行了为期5年的太阳风与地球磁层观测任务后, 1985年近距离飞越彗星Giacobini-Zinner并穿越其彗尾, 是人类首次彗星飞越任务 <sup>[11]</sup>
Galileo	1989	NASA	在飞往木星途中, 于1991年近距离飞越小行星951 Gaspra, 1993年近距离飞越小行星243 Ida, 是人类首次拍摄小行星的高清图像 <sup>[12,13]</sup>
NEAR Shoemaker	1996	NASA	1997年近距离飞越小行星253 Mathilde, 2000年与主目标星433 Eros交会进入环绕轨道, 并于2001年着陆于Eros表面, 是人类首次小行星环绕着陆任务 <sup>[14]</sup>
Cassini	1997	NASA, ESA	2000年在飞往土星途中飞越了小行星2685 Masursky, 随后对土星系统内多个小卫星如Atlas, Pan, Pandora等进行了高清成像 <sup>[15]</sup>
Deep Space 1	1998	NASA	1999年近距离飞越小行星9969 Braille, 2001年近距离飞越彗星19P/Borrelly <sup>[16]</sup>
Stardust	1999	NASA	2002年近距离飞越小行星5535 Annefrank, 2004年近距离飞越彗星81P/Wild, 穿过其彗发并收集了尘埃颗粒, 样品于2006年成功返回地球, 是人类首次小天体采样返回任务, 随后探测器于2011年近距离飞越彗星9P/Tempel, 观测到Deep Impact在其上所形成的撞击坑 <sup>[17]</sup>
Hayabusa	2003	JAXA	2005年交会并着陆于小行星25143 Itokawa, 期间采集了表层样本, 样品舱于2010年返回地球, 是人类首次小行星采样返回任务 <sup>[18,19]</sup>
Mars Express	2003	ESA	在环绕火星期间, 捕获到火星卫星Phobos和Deimos的详细图像 <sup>[20]</sup>
Rosetta	2004	ESA	2008年近距离飞越小行星2867 Šteins, 2010年近距离飞越小行星21 Lutetia, 2014年到达目的地彗星67P/Churyumov-Gerasimenko并进入环绕轨道, 随后释放着陆器Philae, 在其伴飞2年后以硬着陆的形式结束任务, 是人类首次彗星环绕与着陆任务 <sup>[21,22]</sup>
Deep Impact	2005	NASA	2005年近距离飞越9P/Tempel, 分离出的撞击器成功撞击彗核, 并暴露出其内部新鲜物质, 是人类首次小天体撞击任务 <sup>[23]</sup>
New Horizons	2006	NASA	2006年掠过小行星132524 APL, 2015年近距离飞越矮行星Pluto系统, 2019年近距离飞越柯伊伯带小天体486958 Arrokoth <sup>[24]</sup>
Dawn	2007	NASA	2011年与小行星4 Vesta交会并进行了为时一年的环绕探测, 2012年启程前往矮行星1 Ceres并于2015年进入环矮行星轨道 <sup>[25,26]</sup>
Chang'e 2	2010	CNSA	2012年近距离飞越小行星4179 Toutatis <sup>[8]</sup>
Hayabusa2	2014	JAXA	2018年与目标星162173 Ryugu交会并实施表层采样, 期间释放了MASCOT等多个着陆器, 并进行了撞击实验, 于2020年成功将样本送回地球, 计划于2031年近距离飞越小行星1998 KY <sub>26</sub> <sup>[27]</sup>
OSIRIS-REx	2016	NASA	2018年与目标星101955 Bennu交会并实施表层采样, 期间首次近距离观察到小行星上的颗粒喷发事件, 计划于2023年将样品送回地球 <sup>[28]</sup>
DART	2021	NASA	计划于2022年撞击双小行星系统65803 Didymos的卫星, 以测试动能撞击轨道偏转防御效能 <sup>[29]</sup>
Lucy	2021	NASA	计划于2025年近距离飞越主带小行星52246 Donaldjohanson, 并在2027年至2033年近距离探测五颗不同的木星特洛伊小行星 <sup>[30]</sup>
Psyche	2022	NASA	计划于2026年到达小行星16 Psyche, 其被认为可能是早期行星的金属内核 <sup>[31]</sup>
Janus	2022	NASA	计划于2026年近距离飞越双小行星系统(175706) 1996 FG <sub>3</sub> 和(35107) 1991 VH <sup>[32]</sup>
Hera	2024	ESA	计划于2027年到达双小行星系统Didymos, 以对DART任务的撞击效果进行评估, 还将携带多个立方星载荷进行小行星内部结构勘测 <sup>[33]</sup>
ZhengHe	2024	CNSA	计划首先对小行星469219 Kamo'oalewa进行着陆与采样探测, 将样品送回地球后, 再与主带彗星133P/Elst-Pizarro交会, 进行为期至少一年的环绕探测 <sup>[34]</sup>
MMX	2024	JAXA	计划于2025年在火卫一Phobos上着陆, 并进行地表巡游与土壤采样, 样品将于2029年返回地球 <sup>[35]</sup>
DESTINY+	2024	JAXA	计划于2028年近距离飞越小行星3200 Phaethon, 研究其尘埃喷发现象 <sup>[36]</sup>

附近的活跃地质活动。

### 2.2.3 OSIRIS-REx

美国采样小行星的OSIRIS-REx号探测器, 于2016年9月发射, 2018年底到达小行星101955 Benu, 进入了约1 km高的史上最低环绕探测轨道. 但在随后更详细的地貌勘探中发现, Benu表面并非像预想的平坦光滑, 相反表面覆盖着大量崎岖砾石, 直径大多在10~20 m之间, 甚至可达近60 m<sup>[39]</sup>, 任务组不得不花费将近一年的时间寻找安全的采样区域. 在随后的接触采样中, 采样杆在5 s接触时间内下降了48 cm, 远超过预计侵入深度, 且在探测器点火上升前仍保持下降速度, 这说明微重力下的小天体颗粒风化层远比我们想象的要松软. 好在, 更深的侵入深度一定程度上有利于OSIRIS-REx的采样, 这只是一个“幸福的烦恼”, 但对于计划稳固锚定、长期附着在小行星表面的探测器来说, 需要更深入地理解微重力环境下的颗粒动力学以解决这一问题.

OSIRIS-REx目前还未离开Benu, 但是已有的诸多发现已经解答和丰富了小天体研究领域的诸多重大问题: 光谱分析检测到水合矿物的存在, 获取了人类目前最高分辨率的地外天体地形图, 首次近距离观察到类似活跃彗星的小行星颗粒喷发事件, 这一现象可能将改写彗星与小行星的定义.

Hayabusa探测器和Philae着陆器的失败, 以及OSIRIS-REx任务面临的困难与意外表明, 接触探测过

程是整个小天体探测流程中最为核心的环节, 而弱引力小天体的复杂颗粒地貌, 给接触带来了极大的挑战和风险. 因此, 准确把握小天体表层颗粒物质的动力学特性, 是任务成功实施的关键.

## 3 小天体表层颗粒动力学的研究现状

天文观测与深空探测数据表明, 小天体多为由几毫米至几十米的碎石颗粒在引力作用下的聚合物, 表面覆盖一层被称为风化层的细致、疏松的颗粒物质<sup>[39-41]</sup>, 如图1所示. 在星体产生的微重力环境下, 风化层构成的无序颗粒体系处于液固边界的临界相, 在极小的外部扰动下就会出现结构弛豫, 表现出近流体的特性; 而离散颗粒间的非弹性碰撞将耗散能量快速转移至原子层面, 体系在微扰消失后又会恢复近固体刚性<sup>[42]</sup>. 这种固-液之间的非平衡相变是颗粒物质之所以特殊的本征特性, 而小天体的独特微重力环境又使得这一相转变更为复杂且频繁. 另外, 由于颗粒显著的离散特性, 体系内部的结构不均匀性与动力学不均匀性导致其与一般固体与流体的性质截然不同, 被认为是一种新的物质聚集状态<sup>[43]</sup>. 正因为颗粒体系如此复杂, 迄今还没有很好的理论来描述其特性. 1991年诺贝尔物理学奖得主Pierre-Gilles de Gennes<sup>[44]</sup>曾评论, “1998年的颗粒系统研究水平相当于1930年的固体物理研究水平”. 而Science也将颗粒动力学理论列为125

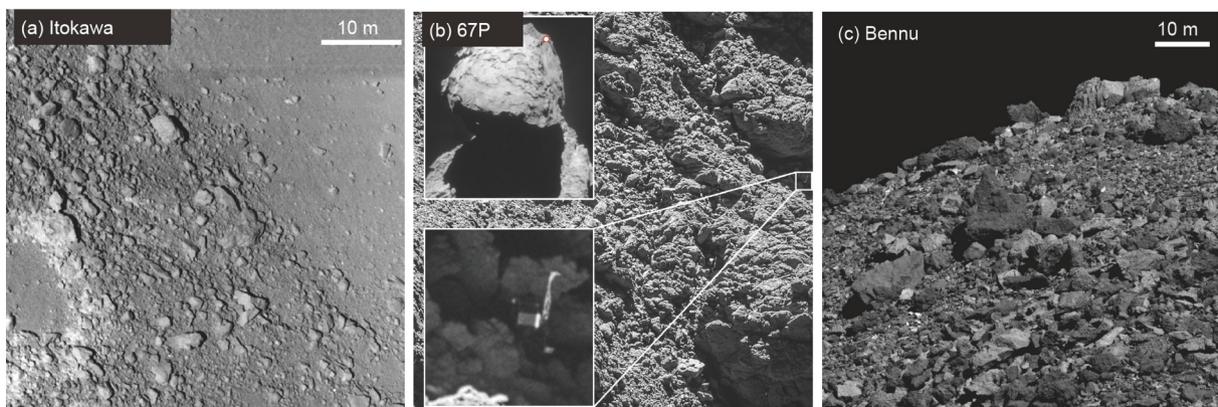


图1 探测任务所拍摄的小天体地表颗粒地貌. (a) Hayabusa拍摄的小行星Itokawa (JAXA/ISAS/Univ. Tokyo); (b) 卡在彗星67P楔形缝隙内的Philae着陆器(ESA); (c) OSIRIS-REx拍摄的小行星Benu (NASA/Goddard/Univ. Arizona)

Figure 1 Images of granular surfaces of small bodies taken by previous space missions. (a) Image of asteroid Itokawa taken by Hayabusa (JAXA/ISAS/Univ. Tokyo); (b) Philae lander wedged against a cliff on comet 67P (ESA); (c) image of asteroid Benu taken by OSIRIS-REx (NASA/Goddard/Univ. Arizona).

大科学难题之一<sup>[45]</sup>。因此, 深入理解小天体表面颗粒风化层的多尺度、高维度、强非线性的复杂动力学行为, 将有助于处在科学前沿的颗粒基础理论的突破。

接触探测任务主要包括探测器抵近接触、着陆器跳跃巡视、采样器地表采样等一系列复杂的操作, 而这些操作均需要与小天体表面活跃的颗粒风化层物质进行动力学相互作用。如何克服OSIRIS-REx探测器遇到的侵入过深问题, 如何防止Philae着陆器遇到的意外弹跳, 如何在小天体颗粒层进行高效巡游以及安全采样, 等等, 这些工程基础科学问题均需要对颗粒碎石系统的动力学机理进行深入研究, 这将是小天体接触探测任务成功实施的前提和基础。

此外, 小天体接触探测任务的最终目的是服务于科学探索, 而小天体的科学价值正蕴藏于其表面独特的地质地貌特征中。颗粒风化层活跃的动力学性质使得其记录了小天体乃至太阳系数亿万年尺度的演化历史, 因而从动力学层面理解弱引力下小天体颗粒物质的地质演化机制, 揭示在地质时间尺度上表面颗粒层在多种空间作用下的演化过程, 理解小天体上特殊颗粒地貌所蕴藏的动力学意义, 对于分析小天体起源、获取太阳系演化信息等重大科学问题至关重要。相关研究也将反哺接触探测任务的设计论证, 与观测数据相结合从而为工程操作提供小天体表层颗粒的关键动力学信息。

### 3.1 探测器表层操作中颗粒行为

小天体表面颗粒物质接触动力学是探测器附着并实施高精度接触探测的基础问题。当外界物体接触与侵入颗粒系统时, 其会受到来自颗粒介质内部的支撑作用, 即表现为侵入阻力。对颗粒系统侵入阻力的研究最早可以追溯到法国力学家Poncelet于1829年发表的文章, 其假定颗粒阻力与流体阻力形式相似。20世纪90年代以来, 在诺贝尔奖得主de Gennes的倡导下, 这一问题再次引起了人们的兴趣。通过研究自由落体的球体侵入沙砾层的过程, Uehara等人<sup>[46]</sup>发现释放高度与侵入深度存在幂次定律, 这一定律很好地刻画了散体介质侵入的本征行为, 在不同几何形状与不同密度的侵入物<sup>[47,48]</sup>、不同摩擦性质与不同厚度的颗粒层<sup>[49,50]</sup>中均得到了较好的吻合效果。由于侵入深度事实上取决于颗粒系统的阻力特性, 根据实验得到的幂次定律, 人们开始尝试推测散体介质侵入阻力的可能

形式<sup>[51]</sup>, 而动态阻力直接测量技术<sup>[52]</sup>的大规模应用逐渐揭开了它的神秘面纱。2007年, Katsuragi和Durian<sup>[53]</sup>总结了颗粒侵入阻力的一般形式, 包括与侵入速度平方成正比的惯性阻尼力, 以及与侵入深度相关的类静水压力。其中, 惯性阻尼力在颗粒系统高速侵入过程中起主导作用, 其与颗粒系统摩擦性质、密度以及侵入物横截面积相关<sup>[54]</sup>。高速侵入实验与仿真<sup>[55,56]</sup>表明, 速度平方阻力项的物理根源为侵入物与颗粒系统的动量和动能交换。基于此, 多个团队分别提出了适用于二维与三维的颗粒群撞击模型, 很好地刻画了惯性阻尼力的宏观作用机制<sup>[57-59]</sup>。类静水压力在颗粒系统准静态侵入过程中起主导作用<sup>[60]</sup>, 除了与上述因素相关外, Nordstrom等人<sup>[61]</sup>还发现系统内应力也会影响准静态阻力的大小。与惯性阻尼力类似, 类静水压力也与颗粒介质的内部结构息息相关, 以流变失效机制为核心的局部摩擦模型与实验数据比较吻合<sup>[62,63]</sup>, 但仍需要确定经验性的拟合参数。而最近提出的修正阿基米德定律<sup>[64]</sup>基于散体塑性破坏准则, 能够完全量化颗粒系统的准静态侵入阻力, 取得了广泛关注。需要注意的是, 以上研究大多着眼于一般形式下的颗粒阻力, 针对小天体颗粒风化层这一特例的研究不能忽略探测器的实地测量数据。Hayabusa任务组利用接触采样时的受力数据, 反推了Itokawa小行星风化层的力学性质范围<sup>[38]</sup>。关于彗星风化层的接触数据来自于67P的着陆任务, 利用Philae着陆器的弹跳轨迹与接触压痕, Rosetta任务组推测第一弹跳点的抗压强度约为1 kPa<sup>[22]</sup>, 而第二弹跳点仅为12 Pa<sup>[65]</sup>, 其上携带的MUPUS探针得到的次表层强度大于2 MPa<sup>[66]</sup>, 如此巨大的力学性质差异给未来的小天体接触探测任务提出巨大的挑战。

探测器到达小天体后需释放巡视器对小天体进行大范围、高精度的近距探测。由于小天体引力微弱且表面地形复杂, 适用于大天体的轮式行走方式难以适用, 弹跳运动是目前公认的小天体表面运动的主要模式<sup>[67]</sup>。该运动方式利用着陆器内部执行机构提供力矩使巡视器加速旋转, 小天体表面的支持力产生法向加速度, 表面摩擦力产生切向加速度, 从而使巡视器从小天体表面跃起, 由于小天体的弱引力环境, 即使很小的速度也可以实现较远距离的转移。据此, 各大航天机构均提出了各自的内置驱动式弹跳巡视器设计方案, 如日本宇航局的Minerva、德国宇航局的MAS-

COT、美国喷气推进实验室与斯坦福大学的Hedgehog、麻省理工学院的PANIC等。由于小天体崎岖岩块与松散砂砾并存的特殊地貌特征,使得揭示弹跳巡视器与小天体颗粒介质的相互作用机理至关重要。采用近似的连续固体接触模型,研究人员初步分析了巡视器在小天体表面的弹跳移动过程<sup>[68,69]</sup>。但连续固体本构模型与实际构成小天体风化层的散体砂砾的力学特征差别较大,后续工作开始考虑颗粒系统的离散特征。Maurel等人<sup>[70]</sup>初步研究了巡视器在颗粒风化层上的着陆过程。Thuillet等人<sup>[71]</sup>在此基础上分析了摩擦性质、接触角度、接触姿态等参数空间,讨论了通过巡视器反弹速度、接触压强等弹跳数据反演风化层力学性质的可能性。Cheng等人<sup>[72]</sup>进一步研究了颗粒介质上的受控弹跳过程,发现了巡视器宏观状态的动力学特征以及颗粒层的介观尺度响应。值得一提的是, Hayabusa2任务所携带的巡视器MASCOT在经历两次自然弹跳后成功着陆小行星Ryugu表面,并实施了4次主动移动,证实了弹跳移动机制的有效性,但返回数据表明最大移动距离仅约70 cm<sup>[73]</sup>,距离大范围巡视探测仍有较大上升空间。

探测器在小天体表层上另一个重要的操作是风化层采样。小天体微弱的引力场,决定了其表面逃逸速度极低,传统的钻掘采样等方案难以适用。目前国外已实施或正在实施的小天体采样主要采用接触即离(Touch-And-Go)机制,即利用探测器接触小天体地表瞬间,通过某种方式将表面土壤弹起以收集弹出物质,如日本Hayabusa和Hayabusa2采用的射弹采样<sup>[74]</sup>与美国OSIRIS-REx的射流采样<sup>[75]</sup>。其中,射弹采样方案指在采样装置接触到小天体表层时发射高速射弹撞击风化层,向上飞溅的岩石碎片在挡板作用下反弹入返回舱,整个过程仅持续约1 s<sup>[74]</sup>。射流采样利用接触小天体表面的短暂时间,通过释放出的高速氮气搅动风化层颗粒,土壤样品跟随气体流入收集舱<sup>[75]</sup>。由于接触采样过程往往十分短暂,理解颗粒物质在采样过程中的运输机理,提高采样效率,将是小天体采样任务的核心。Schwartz等人<sup>[76]</sup>研究了不同小天体颗粒物理参数下的射弹采样过程,发现颗粒的弹性系数对溅射过程影响不大,但溅射质量对摩擦系数依赖性高。Cheng等人<sup>[77]</sup>进一步研究了溅射采样机构所应采用的射弹形状。Schäfer等人<sup>[78]</sup>模拟了小天体风化层的切削与抛射过程,并讨论了采样头设计与采样效率的依赖关系。

### 3.2 空间作用下风化层地质演化

近二十年以来,通过分析小天体的分布信息和探测数据,人类了解到小天体在46亿年的演化历程中主要经历了撞击、热力循环、潮汐作用、太阳光压摄动(如Yarkovsky效应和YORP效应)等多空间作用力和多物理场的耦合作用。在太阳系长期而缓慢的演化过程中,小天体较为活跃的碎石表层在这些空间复杂摄动环境下产生丰富而复杂的变化,形成独特的地质地貌特征,如小行星Itokawa巨石沙砾交界区的叠瓦状构造<sup>[79]</sup>、双叶型彗星67P的颈部裂纹<sup>[80]</sup>与涟漪状沙丘<sup>[81]</sup>、小行星Bennu与Ryugu特殊的陀螺形貌<sup>[27,28]</sup>、火卫一Phobos表面神秘的平行沟壑<sup>[82]</sup>等。这些地质地貌特征成为其复杂演化过程的化石,记录了小天体乃至太阳系数亿万年尺度的动力学演化历史,因而从动力学层面上根据接触探测获得的精细数据,剖析小天体起源、预测小天体地貌演变趋势等科学问题是开展小天体接触探测任务的主要科学目标之一。

撞击坑是小天体表面最为醒目的构造形迹,是小天体地质演化最为重要的外源激励。全局尺度的撞击作用能够极大地破坏小天体的内部结构从而改变其整体形貌,甚至导致其构型的改变从而形成碎石堆小天体族<sup>[83]</sup>,受到撞击的小天体或破碎重聚,或冲蚀变形,或积聚增生,产生了丰富的动力学过程,花生型的小行星<sup>[84]</sup>、双叶型的彗星<sup>[85]</sup>、饺子型的土星小月亮<sup>[86]</sup>乃至雪人型的柯伊伯带小天体<sup>[87]</sup>可能都是不同撞击模式下的产物。在小天体的后续演化过程中,来自高速流星体等局部尺度的撞击作用不容忽视。其中最为直观的结果为其表面坑坑洼洼的陨石坑,它们的大小、形貌、密度统计分布等记录了小天体在遥远过去受撞击时刻的瞬间,被诸多研究人员用来追踪小天体的演化历史<sup>[88-90]</sup>。除此之外,流星体撞击后产生的溅射碎石在小天体的弱引力场下或逃逸出小天体引力场形成类喷发事件<sup>[91]</sup>,或沉积掩盖原有地质结构<sup>[92]</sup>,或再次相对高速地降落到小天体表面形成次生撞击坑<sup>[93]</sup>,将会进一步改变小天体的地质地貌。撞击引起的应力波还可能使得撞击坑附近区域出现非弹性大形变,在风化层较为疏松时,引起局部的滑坡,这一过程可能造成原有撞击坑的退化,从而抹去附近区域的小型撞击坑<sup>[94,95]</sup>;在风化层凝聚力强度较大或其下方存在强岩层时,脆性形变将成为主要的失效模式,裂纹

的萌生与扩展集中出现, 这一撞击撕裂机制很可能是小天体表面线性洼地构造<sup>[96]</sup>的成因。由于小天体的尺寸较小, 撞击引起的冲击波会在内部多次反射、传播, 从而引起小天体局部或整体结构的长期地质震动, 颗粒风化层在振荡作用下将产生振动对流和巴西豆效应<sup>[97,98]</sup>, 使得内部较大的岩石逐渐上升到小天体表面, 这样的颗粒偏析现象已在诸多小天体如Eros和Itokawa上被观测证实<sup>[40,79]</sup>。

尽管小天体内部普遍不存在板块运动、岩浆活动或岩石变质作用, 但仍具有诸多内生扰动驱动其地质演化。小天体内部可能存在的挥发物在其轨道靠近太阳时将逐渐不稳定, 剧烈的相变将携带尘埃高速喷发, 在小天体表面留下像排气孔一样的孔洞<sup>[99]</sup>, 释放出的巨大能量将同时引发风化层的大规模物质坡移。Rosetta任务在伴飞彗星67P至接近近日点的过程中, 观测到了诸多此类季节性地质特征的形成<sup>[100]</sup>。除了挥发物引起的不稳定性外, 日热循环引起的小天体内部热力疲劳也可能促进风化层的地质演化。由于几乎没有大气的存在, 小天体表面昼夜温差极大, 日落时由于表面冷却产生收缩, 日出时由于表面加热产生膨胀, 亿万年尺度下如此热应力循环将会导致岩石的裂解<sup>[101]</sup>, 此过程同样将释放出能量引起物质溅射, 但速度一般远小于高速微流星体撞击导致的溅射物质, 因而绝大部分将留存在原地, 被猜测是细粒度风化层的主要形成机制<sup>[102]</sup>。OSIRIS-REx在小行星Bennu上观察到了岩石热分裂广泛存在的直接证据<sup>[103]</sup>, 证实了这一地质演化过程的重要性。

当小天体近距离飞越大行星时, 其受到来自大行星的潮汐应力可能引起小天体整体结构或局部地表的地质活动。剧烈的潮汐作用可能引起双星系统发生塌缩形成密接双星<sup>[104]</sup>, 或与之相反, 撕碎小天体形成多星系统<sup>[105]</sup>。尽管绝大部分近距离飞越不足以引起上述剧烈变化, 但仍可能导致表面风化层的局部崩塌, 从而暴露出内部未经太空风化的新鲜物质, 重塑小天体的地表特征, 而这可能是Q类近地小行星光谱呈现出较弱红化特征的背后机制<sup>[106]</sup>。2029年小行星99942 Apophis将接近地球(约6倍地球半径), 潮汐摄动引起的沙砾坍塌可能会导致表面光学特征变化, 未来对其的观测有机会验证这一机制<sup>[107]</sup>。除此之外, 对于行星小卫星来说, 其宿主天体长时期的潮汐应力将给小天体风化层带来持续的演化动力, 火星—Phobos上两种具备独特

光谱特征的地质单元——蓝区与红区, 就可能来自于此: 潮汐摄动力引起的风化层蠕变速率的差异使得物质剥落速度超过太空风化速度的区域将暴露出内层的物质, 从而呈现出偏蓝的光谱特征, 而红区则相反, 太空风化占据主导地位<sup>[108]</sup>。

空间中另一个对小天体地质演化起至关重要作用的机制为YORP效应, 其指的是小天体不规则形貌造成的非对称反射和再辐射产生合力矩的作用, 会导致小天体的自转周期和自转轴变化<sup>[109]</sup>。对小行星2000 PH5的长期观测证实了YORP效应的确会导致小天体逐渐加速旋转<sup>[110]</sup>, 诸多学者开始对自旋加速小天体的地质演化过程进行详细而深刻的研究, 发现了不同结构、不同密度、不同强度下小天体丰富多样的旋转失效模式<sup>[111-113]</sup>。当风化层凝聚力强度较大时, 内部结构的拉伸断裂可能成为主要形式, 导致小天体整体分裂<sup>[114]</sup>, 2017年小行星P/2013 R3被观测到分裂为低速分离的若干碎片, 很可能就源于此类YORP导致的裂解失效<sup>[115]</sup>。除了整体结构的破坏外, 旋转加速引起的地质应力还可能造成局部的拉伸<sup>[80]</sup>与剪切裂纹<sup>[116]</sup>, 以及区域性的小规模颗粒滑坡事件<sup>[117]</sup>, 如前所述, 滑坡过程中伴生的粒径偏析、叠瓦构造、巨石定向等现象将会进一步丰富小天体的地质地貌<sup>[118]</sup>, OSIRIS-REx探测器在Bennu表面观测到了诸多此类地质遗迹, 暗示了YORP加速引起的滑坡失效是其地质演化的重要驱动力<sup>[119]</sup>。当自旋加速导致离心力超出小天体表面的引力时, 大量疏松的颗粒将会从赤道附近区域抛射, 形成类似于彗星喷发彗尾的羽流结构, 哈勃望远镜在2019年就捕捉到了发生在小行星6478 Gault上的多次喷发事件<sup>[120]</sup>, 观测表明尘埃的溅射速度低于1 m/s, 排除了挥发物受热相变而高速喷发的可能性, 这是YORP引发风化层抛射的强有力证据。这些脱离小天体表面的颗粒物质, 其中尺寸较小的尘埃将被太阳风吹散, 而较大的岩块会在小天体附近较长期存留, 可能在后续演化过程中重新碰撞积聚形成小月亮<sup>[121]</sup>, 这一机制重现了双小行星系统1999 KW4的形成, 在双星生成机制研究中具有里程碑意义。

#### 4 多尺度动力学研究方法

小天体风化层是由大量离散颗粒组成的复杂多体相互作用体系, 与经典连续性固体、流体材料相比, 颗

粒介质具有显著的离散性, 体系内部的结构不均匀导致颗粒系统的动力学不均匀性以及固-液相非平衡转变等本征特性, 从而使得大尺度平均化处理掩盖了这些不均匀结构, 无法真实反映实际颗粒物质异常复杂的宏观性质.

作为典型的多尺度体系, 风化层颗粒系统除了在宏观尺度上存在体系整体的稳定、失效、流变等现象外, 还在细观尺度上表现为颗粒之间的碰撞、摩擦、滚动、黏滞、凝聚等典型接触力学作用, 同时存在以若干颗粒大小为特征长度的介观运动, 即接触力链结构, 如图2所示. 介观尺度结构的几何和动力学性质作为桥梁, 将颗粒介质的细观行为与宏观运动相互联系<sup>[122,123]</sup>, 其位形演化与局域失效较大程度上决定了体系的宏观物理和力学性质, 这是颗粒介质区别于普通固体和流体, 成为新的物质聚集状态的关键所在. 因此, 开展多尺度分析, 探究系统宏观行为与介观过程的跨尺度关联, 是揭示颗粒体系动力学机理的关键, 这已得到了学界的广泛认识.

为了表征颗粒系统在介观层次的运动特征, 人们采用了最先进的实验手段用于其非均匀结构的研究. 光弹技术是测量片状颗粒位置及接触力的直观手段, 通过使用具有双折射效应的光弹性材料, 将其置于偏振光场中, 即可看到施加载荷后颗粒上产生的干涉条纹图, 通常颗粒在接触力越大时越亮, 可以清晰地显示出系统在受载下瞬时接触力大小及其空间分布情况, 美国Duke大学Behringer课题组<sup>[55,56,124]</sup>开创并发展了此方法, 发现颗粒间连成的强力链骨架传递了绝大部分外载荷, 而弱力链仅起次要作用, 确认了颗粒体系在介观尺度仍具有强非均匀性, 并提出了准直性、应力阈值等力链网络辨识标准. 由于光弹方法实验本身的限制, 其仅适用于二维颗粒系统, 无法清晰显示三维颗粒体系的位置和接触力, 近来, 研究人员发展

了正电子发射颗粒跟踪、核磁共振、同步辐射X射线成像等新技术<sup>[125]</sup>希望透视颗粒体系内部的运动信息, 但仍很难对颗粒的三维运动进行高时空分辨率的测量. 以上实验都在地球重力下进行, 未能涉及小天体的弱引力特性, 而微重力实验是模拟小天体真实动力学环境的有效手段. 但目前实验室中建立微重力条件的手段, 诸如落塔、抛物线飞行、探空火箭、立方卫星以及国际空间站等, 均花费高昂, 且受到测量手段与空间的制约, 仅关注粗粒度的宏观量测量, 无法提供风化层颗粒系统动力学过程的全貌.

近年来计算机软硬件技术的高速发展使得数值仿真成为了解决上述难题的重要手段. 数值模拟成本较低, 易于控制诸多实验难以实现的参数与环境, 且可精确获得颗粒系统三维尺度的物理量, 不受测量条件限制, 因而成为小天体颗粒动力学研究的重要手段. 学界提出了诸多数值模型试图精确刻画小天体风化层颗粒的动力学行为.

当研究问题的尺度远远超过颗粒粒径时, 可以忽略体系内部的物理过程与变形机制, 将颗粒体系等效处理为连续介质, 并采用基于经验和实验数据建立的类似于固体或流体的本构关系模型. 如基于拉格朗日网格的有限元法(finite element method, FEM)<sup>[126]</sup>在处理小天体整体结构应力分布的分析中应用广泛, 光滑粒子流体动力学法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)<sup>[127]</sup>以及物质点法(material point method, MPM)<sup>[128]</sup>在小天体超高速碰撞与塑性流动等问题中应用比较成功.

但如前所述, 连续介质模型的平均化处理可能掩盖了颗粒体系的不均匀结构, 无法真实反映实际颗粒物质表现出的异常复杂的宏观性质. 而离散单元法(discrete element method, DEM)直接以系统内每一个颗粒单元为研究对象, 精确考虑每个颗粒的位置、速度以及外力场与边界条件, 确定性地模拟整个颗粒系统<sup>[122]</sup>. 由于离散单元法能直接从颗粒尺度刻画颗粒系统的宏观响应, 在认识颗粒材料介观尺度结构等方面发挥了强大作用, 成为颗粒系统多尺度动力学分析的强有力工具. 离散单元法的核心为颗粒的接触模型, 主要包括硬球模型与软球模型. 硬球模型将研究的颗粒视为刚体, 忽略颗粒碰撞过程和接触形变等细节, 假设体系中的碰撞在颗粒表面接触单点瞬时发生, 且只考虑二体碰撞, 直接通过正向、切向恢复系数和碰

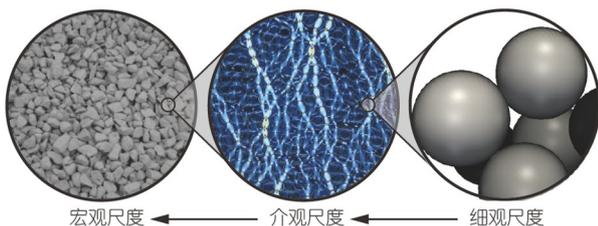


图2 (网络版彩图)颗粒动力学问题的多尺度特性  
Figure 2 (Color online) Multiscale properties of granular dynamics.

撞前颗粒对的位置、速度更新碰撞后的颗粒状态, 仅适合于高速、稀疏的颗粒流模拟。由于硬球法程序实现较为简单, 且积分步长为颗粒自由程时间, 积分效率高、计算耗时短, 早期的小天体颗粒动力学模拟大多采用硬球模型<sup>[129,130]</sup>。但对于小天体颗粒风化层来说, 其孔隙率虽然通常接近50%, 较为疏松, 但仍属于密集颗粒系统(如图1所示), 体系中广泛存在的多颗粒长时接触破坏了硬球模型二体碰撞的核心假设, 导致其不再适用。为了解决上述问题, 最早由Cundall和Strack<sup>[131]</sup>提出并发展建立的软球模型应运而生。软球模型考虑了颗粒碰撞时的形变细节, 将其等效为颗粒之间的重叠, 通过基于接触理论计算的接触力与接触力矩, 精确描述介观尺度上颗粒之间的碰撞、摩擦、滚转、黏附等动力学过程。虽然软球模型计算复杂, 且由于时间步长限制导致积分效率较低, 但其可以很好地处理密集、长时接触的颗粒系统, 并非常适合于大规模并行计算, 近几年来在小天体颗粒动力学领域大放异彩。在东京大学Wada团队<sup>[132]</sup>、马里兰大学Richardson团队<sup>[133]</sup>与科罗拉多大学博尔德分校Sánchez团队<sup>[134]</sup>等研究人员将软球模型引入小天体动力学领域后, Schwartz等人<sup>[135]</sup>加入了颗粒间的烧结力用以模拟强黏合力颗粒系统, Sánchez和Scheeres<sup>[136]</sup>提出了考虑间隙小颗粒间范德华力所引起的凝聚力模型, Zhang等人<sup>[114]</sup>引入了适用于准静态过程的扭转和滚转摩擦模型。目前, 软球离散元数值模拟方法已经成为全面、系统的研究工具, 其基于真实的颗粒物质接触理论, 精细刻画了颗粒系统从细观接触到介观结构再到宏观运动的跨尺度复杂力学过程, 有助于理解风化层物质行为的本质机制, 在小天体风化层颗粒动力学研究中具有广阔的应用前景。

## 5 总结与展望

小天体接触探测如同精密的外科手术, 要求准确把握目标天体的力学特性。目前的接触探测任务所遇到的困难均集中在尚未充分认识目标天体表面颗粒介质的构成、形态、力学特性对探测器动力学行为的影响机理。因此, 建立弱引力下的颗粒多尺度运动理论是未来小天体探测任务迫切的需求。此外, 小天体地表颗粒地质演化问题也已成为航天动力学与行星科学领域

的研究热点, 相关成果在*Nature*和*Science*等综合性期刊上不断涌现。

近几十年对该问题的研究已经使得我们对小天体接触探测颗粒动力学问题的认识有了长足的进展, 但目前仍存在诸多尚未解答的基础性难题。

(1) 小天体附近动力学环境复杂, 涉及多种空间力环境和多种物理场的耦合作用, 如太阳光压、静电效应、昼夜应力等; 而探测器与小天体风化层的接触操作中也可能涉及多种交互机制, 如研磨吹填式采样等。因此, 建立考虑颗粒的破碎解体、冰尘混合、热物理效应、气固耦合等精细动力学模型, 将是未来小天体颗粒动力学模拟的突破方向。

(2) 已有观测表明, 除了地表风化层外, 小天体附近也可能存在大量颗粒物质。它们在小天体的特殊动力学环境下将表现出丰富动力学行为, 甚至可能形成双星系统。对这一问题的研究, 不仅有助于回答行星系统演化相关的科学问题, 而且将应用于碎片云对探测器的潜在威胁评估, 为未来小天体任务的论证设计提供安全保障。

(3) 动能撞击防御被认为是应对近地小行星对地球潜在撞击威胁的较为可行的方案。小行星遭遇撞击后, 溅射物可能在引力作用下重新聚合, 仍然对地球具备较大威胁。且其颗粒结构可能吸收大量撞击能量, 从而影响动能偏转效能。对动能撞击防御场景的颗粒动力学模拟, 将为未来任务的方案设计如撞击位置、角度、速度等提供理论支撑。

(4) 小天体内部碎石堆结构与地表颗粒风化层的相互作用与耦合演化, 可能在小天体地表产生丰富的地质地貌, 例如高速撞击或潮汐交会等外界激励可能导致小天体整体结构出现内部裂缝, 此时风化层颗粒可能渗漏其中, 在地表呈现出相应构造。因此, 小天体地表地质特征是推测其内部结构细节的关键, 这需要对小天体整体结构与局域地表耦合演化过程的深入理解。

时至今日, 小天体颗粒动力学研究领域已经成为航天动力学与行星科学领域的研究热点。未来的研究需要结合小天体探测的最新数据, 应用力学、物理、数学和工程等学科的最新成果, 把握颗粒物质的本质特性, 建立新的概念和范式, 使得小天体地表颗粒动力学的研究有的放矢、更具生命力。

## 参考文献

- 1 Bottke Jr. W F, Cellino A, Paolicchi P, et al. Asteroids III. Tucson: University of Arizona Press, 2003
- 2 Izidoro A, Raymond S N, Pierens A, et al. The asteroid belt as a relic from a chaotic early solar system. *Astrophys J*, 2016, 833: 40
- 3 Lichtenberg T, Dra Žkowska J, Schönbachler M, et al. Bifurcation of planetary building blocks during Solar System formation. *Science*, 2021, 371: 365–370
- 4 Hamilton V E, Simon A A, Christensen P R, et al. Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid (101955) Bennu. *Nat Astron*, 2019, 3: 332–340
- 5 Marty B, Altwegg K, Balsiger H, et al. Xenon isotopes in 67P/Churyumov-Gerasimenko show that comets contributed to Earth's atmosphere. *Science*, 2017, 356: 1069–1072
- 6 Weaver H A, Feldman P D, A'hearn M F, et al. Hubble space telescope observations of comet P/Shoemaker-Levy 9 (1993e). *Science*, 1994, 263: 787–791
- 7 Ross S D. Near-earth asteroid mining. Technical Report. Space Industry Report, Space, 2001. 1–24
- 8 Huang J, Ji J, Ye P, et al. The ginger-shaped asteroid 4179 Toutatis: New observations from a successful flyby of Chang'e-2. *Sci Rep*, 2013, 3: 3411
- 9 Pollack J B, Veverka J, Noland M, et al. Mariner 9 television observations of Phobos and Deimos. *Icarus*, 1972, 17: 394–407
- 10 Tolson R H, Duxbury T C, Born G H, et al. Viking first encounter of Phobos: Preliminary results. *Science*, 1978, 199: 61–64
- 11 Von Roseninge T T, Brandt J C, Farquhar R W. The international cometary explorer mission to comet Giacobini-Zinner. *Science*, 1986, 232: 353–356
- 12 Belton M J S, Veverka J, Thomas P, et al. Galileo encounter with 951 Gaspra: First pictures of an asteroid. *Science*, 1992, 257: 1647–1652
- 13 Belton M J S, Chapman C R, Veverka J, et al. First images of asteroid 243 Ida. *Science*, 1994, 265: 1543–1547
- 14 Veverka J, Farquhar B, Robinson M, et al. The landing of the NEAR-Shoemaker spacecraft on asteroid 433 Eros. *Nature*, 2001, 413: 390–393
- 15 Buratti B J, Thomas P C, Roussos E, et al. Close Cassini flybys of Saturn's ring moons Pan, Daphnis, Atlas, Pandora, and Epimetheus. *Science*, 2019, 364: eaat2349
- 16 Soderblom L A, Becker T L, Bennett G, et al. Observations of Comet 19P/Borrelly by the miniature integrated camera and spectrometer aboard Deep Space 1. *Science*, 2002, 296: 1087–1091
- 17 Brownlee D, Tsou P, Aléon J, et al. Comet 81P/Wild 2 under a microscope. *Science*, 2006, 314: 1711–1716
- 18 Fujiwara A, Kawaguchi J, Yeomans D K, et al. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa. *Science*, 2006, 312: 1330–1334
- 19 Tsuchiyama A, Uesugi M, Matsushima T, et al. Three-dimensional structure of Hayabusa samples: Origin and evolution of Itokawa regolith. *Science*, 2011, 333: 1125–1128
- 20 Witasse O, Duxbury T, Chicarro A, et al. Mars express investigations of Phobos and Deimos. *Planet Space Sci*, 2014, 102: 18–34
- 21 Sierks H, Barbieri C, Lamy P L, et al. On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science*, 2015, 347: aaa1044
- 22 Biele J, Ulamec S, Maibaum M, et al. The landing(s) of Philae and inferences about comet surface mechanical properties. *Science*, 2015, 349: aaa9816
- 23 A'Hearn M F, Belton M J S, Delamere W A, et al. Deep impact: Excavating comet Tempel 1. *Science*, 2005, 310: 258–264
- 24 Stern S A, Weaver H A, Spencer J R, et al. Initial results from the New Horizons exploration of 2014 MU<sub>69</sub>, a small Kuiper Belt object. *Science*, 2019, 364: eaaw9771
- 25 Russell C T, Raymond C A, Coradini A, et al. Dawn at Vesta: Testing the protoplanetary paradigm. *Science*, 2012, 336: 684–686
- 26 Russell C T, Raymond C A, Ammannito E, et al. Dawn arrives at Ceres: Exploration of a small, volatile-rich world. *Science*, 2016, 353: 1008–1010
- 27 Watanabe S, Hirabayashi M, Hirata N, et al. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile. *Science*, 2019, 364: eaav8032
- 28 Lauretta D S, DellaGiustina D N, Bennett C A, et al. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu. *Nature*, 2019, 568: 55–60
- 29 Cheng A F, Michel P, Jutzi M, et al. Asteroid impact & deflection assessment mission: Kinetic impactor. *Planet Space Sci*, 2016, 121: 27–35
- 30 Sharkey B N L, Reddy V, Sanchez J A, et al. Compositional constraints for Lucy Mission Trojan asteroids via near-infrared spectroscopy.

- [Astronom J](#), 2019, 158: 204
- 31 Hérique A, Agnus B, Asphaug E, et al. Direct observations of asteroid interior and regolith structure: Science measurement requirements. [Adv Space Res](#), 2018, 62: 2141–2162
- 32 Scheeres D, McMahon J, Bierhaus E, et al. Janus: A NASA SIMPLEx mission to explore two NEO Binary Asteroids. In: AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts: Volume 52. 2020. 217-06
- 33 Michel P, Kueppers M, Cheng A, et al. The Hera mission: European component of the asteroid impact and deflection assessment (AIDA) mission to a binary asteroid. In: Lunar and Planetary Science Conference: Number 2083. 2018. 1144
- 34 Lin Y, Zhang Y, Hu S, et al. Concepts of the small body sample return missions—The 1st 10 million year evolution of the Solar System. [Space Sci Rev](#), 2020, 216: 45
- 35 Campagnola S, Yam C H, Tsuda Y, et al. Mission analysis for the Martian Moons Explorer (MMX) mission. [Acta Astronaut](#), 2018, 146: 409–417
- 36 Arai T, Kobayashi M, Ishibashi K, et al. DESTINY+ mission: Flyby of Geminids parent asteroid (3200) Phaethon and *in-situ* analyses of dust accreting on the Earth. In: Lunar and Planetary Science Conference: Number 2083. 2018. 2570
- 37 Yu Y, Baoyin H X. Review of orbital dynamics in the vicinity of Solar System small celestial bodies (in Chinese). [J Deep Space Expl](#), 2014, 1: 93–104 [于洋, 宝音贺西. 小天体附近的轨道动力学研究综述. [深空探测学报](#), 2014, 1: 93–104]
- 38 Yano H, Kubota T, Miyamoto H, et al. Touchdown of the Hayabusa spacecraft at the Muses Sea on Itokawa. [Science](#), 2006, 312: 1350–1353
- 39 Walsh K J, Jawin E R, Ballouz R L, et al. Craters, boulders and regolith of (101955) Bennu indicative of an old and dynamic surface. [Nat Geosci](#), 2019, 12: 242–246
- 40 Veverka J, Thomas P C, Robinson M, et al. Imaging of small-scale features on 433 Eros from NEAR: Evidence for a complex regolith. [Science](#), 2001, 292: 484–488
- 41 Sugita S, Honda R, Morota T, et al. The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes. [Science](#), 2019, 364: eaaw0422
- 42 Kou B, Cao Y, Li J, et al. Granular materials flow like complex fluids. [Nature](#), 2017, 551: 360–363
- 43 Jaeger H M, Nagel S R, Behringer R P. Granular solids, liquids, and gases. [Rev Mod Phys](#), 1996, 68: 1259–1273
- 44 de Gennes P G. Granular matter: A tentative view. [Rev Mod Phys](#), 1999, 71: S374–S382
- 45 Kennedy D, Norman C. What don't we know? [Science](#), 2005, 309: 75
- 46 Uehara J S, Ambroso M A, Ojha R P, et al. Low-speed impact craters in loose granular media. [Phys Rev Lett](#), 2003, 90: 194301
- 47 Newhall K A, Durian D J. Projectile-shape dependence of impact craters in loose granular media. [Phys Rev E](#), 2003, 68: 060301
- 48 Ambroso M A, Santore C R, Abate A R, et al. Penetration depth for shallow impact cratering. [Phys Rev E](#), 2005, 71: 051305
- 49 Nelson E L, Katsuragi H, Mayor P, et al. Projectile interactions in granular impact cratering. [Phys Rev Lett](#), 2008, 101: 068001
- 50 Seguin A, Bertho Y, Gondret P. Influence of confinement on granular penetration by impact. [Phys Rev E](#), 2008, 78: 010301
- 51 Stone M B, Bernstein D P, Barry R, et al. Getting to the bottom of a granular medium. [Nature](#), 2004, 427: 503–504
- 52 Goldman D I, Umbanhowar P. Scaling and dynamics of sphere and disk impact into granular media. [Phys Rev E](#), 2008, 77: 021308
- 53 Katsuragi H, Durian D J. Unified force law for granular impact cratering. [Nat Phys](#), 2007, 3: 420–423
- 54 Katsuragi H, Durian D J. Drag force scaling for penetration into granular media. [Phys Rev E](#), 2013, 87: 052208
- 55 Clark A H, Kondic L, Behringer R P. Particle scale dynamics in granular impact. [Phys Rev Lett](#), 2012, 109: 238302
- 56 Clark A H, Petersen A J, Kondic L, et al. Nonlinear force propagation during granular impact. [Phys Rev Lett](#), 2015, 114: 144502
- 57 Takehara Y, Fujimoto S, Okumura K. High-velocity drag friction in dense granular media. [EPL](#), 2010, 92: 44003
- 58 Clark A H, Petersen A J, Behringer R P. Collisional model for granular impact dynamics. [Phys Rev E](#), 2014, 89: 012201
- 59 Cheng B, Yu Y, Baoyin H. Collision-based understanding of the force law in granular impact dynamics. [Phys Rev E](#), 2018, 98: 012901
- 60 Brzinski III T A, Mayor P, Durian D J. Depth-dependent resistance of granular media to vertical penetration. [Phys Rev Lett](#), 2013, 111: 168002
- 61 Nordstrom K N, Lim E, Harrington M, et al. Granular dynamics during impact. [Phys Rev Lett](#), 2014, 112: 228002
- 62 Aguilar J, Goldman D I. Robophysical study of jumping dynamics on granular media. [Nat Phys](#), 2016, 12: 278–283
- 63 Askari H, Kamrin K. Intrusion rheology in grains and other flowable materials. [Nat Mater](#), 2016, 15: 1274–1279
- 64 Kang W, Feng Y, Liu C, et al. Archimedes' law explains penetration of solids into granular media. [Nat Commun](#), 2018, 9: 1101
- 65 O'Rourke L, Heinisch P, Blum J, et al. The Philae lander reveals low-strength primitive ice inside cometary boulders. [Nature](#), 2020, 586: 697–

- 66 Spohn T, Knollenberg J, Ball A J, et al. Thermal and mechanical properties of the near-surface layers of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science*, 2015, 349: aab0464
- 67 Lange C, Ho T M, Grimm C D, et al. Exploring small bodies: Nano- and microlander options derived from the Mobile Asteroid Surface Scout. *Adv Space Res*, 2018, 62: 2055–2083
- 68 Van Wal S, Tardivel S, Scheeres D. Parametric study of ballistic lander deployment to small bodies. *J Spacecraft Rockets*, 2017, 54: 1330–1355
- 69 Van Wal S, Reid R G, Scheeres D J. Simulation of nonspherical asteroid landers: Contact modeling and shape effects on bouncing. *J Spacecraft Rockets*, 2020, 57: 109–130
- 70 Maurel C, Michel P, Biele J, et al. Numerical simulations of the contact between the lander MASCOT and a regolith-covered surface. *Adv Space Res*, 2018, 62: 2099–2124
- 71 Thuillet F, Michel P, Maurel C, et al. Numerical modeling of lander interaction with a low-gravity asteroid regolith surface. *Astron Astrophys*, 2018, 615: A41
- 72 Cheng B, Yu Y, Baoyin H. Numerical simulations of the controlled motion of a hopping asteroid lander on the regolith surface. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 485: 3088–3096
- 73 Jaumann R, Schmitz N, Ho T M, et al. Images from the surface of asteroid Ryugu show rocks similar to carbonaceous chondrite meteorites. *Science*, 2019, 365: 817–820
- 74 Sawada H, Okazaki R, Tachibana S, et al. Hayabusa2 sampler: Collection of asteroidal surface material. *Space Sci Rev*, 2017, 208: 81–106
- 75 Bierhaus E B, Clark B C, Harris J W, et al. The OSIRIS-REx spacecraft and the touch-and-go sample acquisition mechanism (TAGSAM). *Space Sci Rev*, 2018, 214: 1–46
- 76 Schwartz S R, Michel P, Richardson D C, et al. Low-speed impact simulations into regolith in support of asteroid sampling mechanism design I: Comparison with 1-g experiments. *Planet Space Sci*, 2014, 103: 174–183
- 77 Cheng B, Yu Y, Baoyin H. Asteroid surface impact sampling: dependence of the cavity morphology and collected mass on projectile shape. *Sci Rep*, 2017, 7: 10004
- 78 Schäfer C M, Scherrer S, Buchwald R, et al. Numerical simulations of regolith sampling processes. *Planet Space Sci*, 2017, 141: 35–44
- 79 Miyamoto H, Yano H, Scheeres D J, et al. Regolith migration and sorting on asteroid Itokawa. *Science*, 2007, 316: 1011–1014
- 80 Hirabayashi M, Scheeres D J, Chesley S R, et al. Fission and reconfiguration of bilobate comets as revealed by 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Nature*, 2016, 534: 352–355
- 81 Jia P, Andreotti B, Claudin P. Giant ripples on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sculpted by sunset thermal wind. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 2509–2514
- 82 Avanesov G A, Bonev B I, Kempe F, et al. Television observations of Phobos. *Nature*, 1989, 341: 585–587
- 83 Michel P, Benz W, Tanga P, et al. Collisions and gravitational reaccumulation: Forming asteroid families and satellites. *Science*, 2001, 294: 1696–1700
- 84 Michel P, Richardson D C. Collision and gravitational reaccumulation: Possible formation mechanism of the asteroid Itokawa. *Astron Astrophys*, 2013, 554: L1
- 85 Jutzi M, Asphaug E. The shape and structure of cometary nuclei as a result of low-velocity accretion. *Science*, 2015, 348: 1355–1358
- 86 Leleu A, Jutzi M, Rubin M. The peculiar shapes of Saturn's small inner moons as evidence of mergers of similar-sized moonlets. *Nat Astron*, 2018, 2: 555–561
- 87 McKinnon W B, Richardson D C, Marohnic J C, et al. The solar nebula origin of (486958) Arrokoth, a primordial contact binary in the Kuiper Belt. *Science*, 2020, 367: eaay6620
- 88 Housen K R, Holsapple K A, Voss M E. Compaction as the origin of the unusual craters on the asteroid Mathilde. *Nature*, 1999, 402: 155–157
- 89 Jutzi M, Asphaug E, Gillet P, et al. The structure of the asteroid 4 Vesta as revealed by models of planet-scale collisions. *Nature*, 2013, 494: 207–210
- 90 Ballouz R L, Walsh K J, Barnouin O S, et al. Bennu's near-Earth lifetime of 1.75 million years inferred from craters on its boulders. *Nature*, 2020, 587: 205–209
- 91 Bottke W F, Moorhead A V, Connolly Jr. H C, et al. Meteoroid impacts as a source of Bennu's particle ejection events. *J Geophys Res Planets*, 2020, 125: e2019JE006282

- 92 Thomas P C, Veverka J, Robinson M S, et al. Shoemaker crater as the source of most ejecta blocks on the asteroid 433 Eros. *Nature*, 2001, 413: 394–396
- 93 Nayak M, Asphaug E. Sesquinary catenae on the Martian satellite Phobos from reaccretion of escaping ejecta. *Nat Commun*, 2016, 7: 12591
- 94 Richardson J E, Melosh H J, Greenberg R. Impact-induced seismic activity on Asteroid 433 Eros: A surface modification process. *Science*, 2004, 306: 1526–1529
- 95 Hofmann M, Sierks H, Blum J. Small-scale impacts as potential trigger for landslides on small Solar system bodies. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 469: S73–S83
- 96 Prockter L, Thomas P, Robinson M, et al. Surface expressions of structural features on Eros. *Icarus*, 2002, 155: 75–93
- 97 Matsumura S, Richardson D C, Michel P, et al. The Brazil nut effect and its application to asteroids. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 443: 3368–3380
- 98 Chujo T, Mori O, Kawaguchi J, et al. Categorization of Brazil nut effect and its reverse under less-convective conditions for microgravity geology. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 474: 4447–4459
- 99 Vincent J B, Bodewits D, Besse S, et al. Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse. *Nature*, 2015, 523: 63–66
- 100 El-Maarry M R, Groussin O, Thomas N, et al. Surface changes on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko suggest a more active past. *Science*, 2017, 355: 1392–1395
- 101 Molaro J L, Byrne S, Le J L. Thermally induced stresses in boulders on airless body surfaces, and implications for rock breakdown. *Icarus*, 2017, 294: 247–261
- 102 Delbo M, Libourel G, Wilkerson J, et al. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids. *Nature*, 2014, 508: 233–236
- 103 Molaro J L, Walsh K J, Jawin E R, et al. *In situ* evidence of thermally induced rock breakdown widespread on Benu’s surface. *Nat Commun*, 2020, 11: 2913
- 104 Hu S, Ji J, Richardson D C, et al. The formation mechanism of 4179 Toutatis’ elongated bilobed structure in a close Earth encounter scenario. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 478: 501–515
- 105 Zhang Y, Lin D N C. Tidal fragmentation as the origin of 11/2017 U1 (‘Oumuamua). *Nat Astron*, 2020, 4: 852–860
- 106 Binzel R P, Morbidelli A, Merouane S, et al. Earth encounters as the origin of fresh surfaces on near-Earth asteroids. *Nature*, 2010, 463: 331–334
- 107 Yu Y, Richardson D C, Michel P, et al. Numerical predictions of surface effects during the 2029 close approach of asteroid 99942 Apophis. *Icarus*, 2014, 242: 82–96
- 108 Ballouz R L, Baresi N, Crites S T, et al. Surface refreshing of Martian moon Phobos by orbital eccentricity-driven grain motion. *Nat Geosci*, 2019, 12: 229–234
- 109 Bottke Jr. W F, Vokrouhlický D, Rubincam D P, et al. The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2006, 34: 157–191
- 110 Lowry S C, Fitzsimmons A, Pravec P, et al. Direct detection of the asteroidal YORP effect. *Science*, 2007, 316: 272–274
- 111 Walsh K J, Richardson D C, Michel P. Spin-up of rubble-pile asteroids: Disruption, satellite formation, and equilibrium shapes. *Icarus*, 2012, 220: 514–529
- 112 Sánchez P, Scheeres D J. Disruption patterns of rotating self-gravitating aggregates: A survey on angle of friction and tensile strength. *Icarus*, 2016, 271: 453–471
- 113 Hirabayashi M, Nakano R, Tatsumi E, et al. Spin-driven evolution of asteroids’ top-shapes at fast and slow spins seen from (101955) Benu and (162173) Ryugu. *Icarus*, 2020, 352: 113946
- 114 Zhang Y, Richardson D C, Barnouin O S, et al. Rotational failure of rubble-pile bodies: Influences of shear and cohesive strengths. *Astrophys J*, 2018, 857: 15
- 115 Jewitt D, Agarwal J, Li J, et al. Disintegrating asteroid P/2013 R3. *Astrophys J*, 2014, 784: L8
- 116 Matonti C, Attree N, Groussin O, et al. Bilobate comet morphology and internal structure controlled by shear deformation. *Nat Geosci*, 2019, 12: 157–162
- 117 Hirabayashi M, Sánchez D P, Scheeres D J. Internal structure of asteroids having surface shedding due to rotational instability. *Astrophys J*, 2015, 808: 63

- 118 Cheng B, Yu Y, Asphaug E, et al. Reconstructing the formation history of top-shaped asteroids from the surface boulder distribution. *Nat Astron*, 2021, 5: 134–138
- 119 Jawin E R, Walsh K J, Barnouin O S, et al. Global patterns of recent mass movement on asteroid (101955) Bennu. *J Geophys Res Planets*, 2020, 125: e06475
- 120 Kleyna J T, Hainaut O R, Meech K J, et al. The Sporadic Activity of (6478) Gault: A YORP-driven event? *Astrophys J*, 2019, 874: L20
- 121 Walsh K J, Richardson D C, Michel P. Rotational breakup as the origin of small binary asteroids. *Nature*, 2008, 454: 188–191
- 122 Sun Q C, Wang G Q. Introduction to Granular Mechanics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论. 北京: 科学出版社, 2009]
- 123 Wang D, Ren J, Dijkstra J A, et al. Microscopic origins of shear jamming for 2D frictional grains. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 208004
- 124 Howell D, Behringer R P, Veje C. Stress fluctuations in a 2D granular Couette experiment: A continuous transition. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 5241–5244
- 125 Yang H, Zhang G H, Wang Y J, et al. Measurement techniques of grain motion and inter-grain structures in dense granular materials (in Chinese). *Adv Mech*, 2018, 48: 541–590 [杨晖, 张国华, 王宇杰, 等. 密集颗粒体系的颗粒运动及结构测量技术. 力学进展, 2018, 48: 541–590]
- 126 Hirabayashi M, Scheeres D J. Stress and failure analysis of rapidly rotating asteroid (29075) 1950 DA. *Astrophys J*, 2015, 798: L8
- 127 Asphaug E, Ostro S J, Hudson R S, et al. Disruption of kilometre-sized asteroids by energetic collisions. *Nature*, 1998, 393: 437–440
- 128 El Mir C, Ramesh K T, Richardson D C. A new hybrid framework for simulating hypervelocity asteroid impacts and gravitational reaccumulation. *Icarus*, 2019, 321: 1013–1025
- 129 Leinhardt Z M, Richardson D C, Quinn T. Direct *N*-body simulations of rubble pile collisions. *Icarus*, 2000, 146: 133–151
- 130 Richardson D C, Walsh K J, Murdoch N, et al. Numerical simulations of granular dynamics: I. Hard-sphere discrete element method and tests. *Icarus*, 2011, 212: 427–437
- 131 Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 1979, 29: 47–65
- 132 Wada K, Senshu H, Matsui T. Numerical simulation of impact cratering on granular material. *Icarus*, 2006, 180: 528–545
- 133 Schwartz S R, Richardson D C, Michel P. An implementation of the soft-sphere discrete element method in a high-performance parallel gravity tree-code. *Granular Matter*, 2012, 14: 363–380
- 134 Sánchez P, Scheeres D J. Simulating asteroid rubble piles with a self-gravitating soft-sphere distinct element method model. *Astrophys J*, 2011, 727: 120
- 135 Schwartz S R, Michel P, Richardson D C. Numerically simulating impact disruptions of cohesive glass bead agglomerates using the soft-sphere discrete element method. *Icarus*, 2013, 226: 67–76
- 136 Sánchez P, Scheeres D J. The strength of regolith and rubble pile asteroids. *Meteorit Planet Sci*, 2014, 49: 788–811

## Recent advances in granular dynamics for small-body touchdown missions

CHENG Bin<sup>1</sup>, YU Yang<sup>2</sup> & BAOYIN HeXi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

<sup>2</sup> *School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

Exploring the vast universe is a shared dream of humankind, and small bodies are indispensable targets that can provide crucial information regarding the formation of the Solar System, the emergence of life on the early Earth, defending our planet from impact hazards, and utilizing the planetary resources. In the context of the forthcoming boom in small-body touchdown exploration, first, the history of previous small-body missions was reviewed, and the great challenge posed by their granular regolith surfaces to touchdown operations was analyzed. The scientific value of granular dynamics for small-body touchdown missions was summarized. Subsequently, the development in the study of the multiscale dynamics behavior of granular regolith driven by surface operations and geophysical forces was examined in detail. Finally, the future research direction was discussed.

**small bodies, regolith, granular dynamics, deep space exploration, touchdown**

doi: [10.1360/SST-2021-0169](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0169)