



小行星的物理性质与结构演化研究进展

张韵, 李俊峰*

清华大学航天航空学院, 北京 100084

*联系人, E-mail: lijunf@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2018-10-12; 接受日期: 2018-12-19; 网络出版日期: 2019-04-23

国家自然科学基金(编号: 11572166)资助项目

摘要 小行星上蕴含着丰富的稀有矿物资源, 并保存着太阳系形成初期的原始成分, 是研究太阳系起源和演化历史的活化石, 具有极大的科学价值。随着近二十年来小行星探测热潮的兴起, 对小行星的研究已从轨道、形状、旋转状态和光谱类型扩展到结构演化机制和外力响应特性。小行星碎石堆结构概念的提出, 为所观测到小行星的物理性质和天文现象提供了合理的解释, 同时也对小行星探测任务及相关研究提出了诸多挑战。本文从小行星的轨道和物理性质分布出发, 分析了小行星结构的演化过程, 阐明了大部分等效直径大于300 m的小行星应具有碎石堆结构的必然性, 并结合颗粒材料的力学性质分析了碎石堆小行星的结构特点和动力学响应特性, 对碎石堆小行星的研究现状进行了综述, 讨论了其中的科学问题和研究方向。

关键词 小行星, 结构演化, 碎石堆结构, 离散元方法

PACS: 96.30.Ys, 61.43.Bn, 45.70.-n

1 引言

太阳系中的小行星, 通常指那些绕日运行又不易挥发出气体和尘埃的小天体。现代天体物理学普遍认为小行星是太阳系大行星形成过程中的残余碎片^[1,2]。小行星上蕴含着丰富的稀有矿物资源, 并保存着太阳系星云形成初期的原始成分, 是研究太阳系起源和演化历史的“活化石”; 而小行星上包含的有机物质和成分水也很可能是地球上有机生命体的来源; 另外, 部

分小行星运行于近地轨道上, 对地球具有潜在撞击威胁, 研究其结构成分及动力学响应对开展规避任务具有重要意义。

自从1801年意大利天文学家Piazzi采用简易的Ramsden环装置发现第一颗小行星1 Ceres^[1](2006年被重新归类为矮行星)以来, 随着天文观测技术水平的不断提高, 被发现的小行星数量不断增加。截止至2018年6月30日, 有正式编号的小行星数量已超过52万颗, 其中约95%的小行星为近二十年所发现^[2]。

1) 本文首次提到某颗小行星时以“数字+名称”形式表示, 为叙述方便, 后文将略去数字。

2) 数据来源: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/NumberedPerYear.html>

引用格式: 张韵, 李俊峰. 小行星的物理性质与结构演化研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 084502
Zhang Y, Li J F. Physical properties and structural evolution of asteroids (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 084502, doi: [10.1360/SSPMA2018-00352](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00352)

随着空间技术的进步, 对小行星的探索方式从地基的观测活动拓展到各种形式的深空探测项目。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)先后提出并实施了以不同小行星为目标的深空探测计划, 旨在占领空间技术战略制高点, 在未来空间资源争夺和综合国力竞争中保持优势。**表1**对已完成和正在活跃工作中的小行星探测任务进行了统计^[3-16]。探测目标涵盖了不同光谱类型与不同轨道类型的小行星。小行星探测任务的形式从初期的近距飞越探测(如Galileo号探测器)发展到近期的小行星环绕着陆探测(如NEAR-Shoemaker号探测器), 再到小行星采样返回探测(如Hayabusa号探测器)。随着小行星探测技术的不断成熟, 未来的小行星探测形式将更为多样。例如目前正在预研阶段的AIDA任务(由NASA和ESA联合设计, 以小行星动能撞击防御为背景, 任务包含两个探测器, 其中ESA探测器

Hera环绕探测S型近地双小行星系统65803 Didymos, NASA探测器DART将高速撞击从星)^[17]。

基于地基观测和**表1**所列探测任务, 人类目前已初步了解太阳系内小行星的轨道分布、基本化学组成、大小分布、自旋速率分布及个别小行星的地形地貌等, 并认识到它们的这些物理性质是在太阳系的复杂动力学环境中演化的结果^[18,19]。本文结合现有关于小行星的观测、探测数据以及理论和数值研究等方面成果, 梳理了近二十年来人们对小行星的分布、结构及其动力学演化特性的认识的发展, 分析了一特殊结构类型的小行星—碎石堆小行星的研究现状, 为相关领域的研究者们提供参考。

2 小行星的轨道与物理性质

小行星不仅数量庞大, 其物理性质也非常复杂多

表1 已完成或正在进行中的小行星探测任务

Table 1 Completed or on-going asteroid missions

任务名称	机构	任务描述
Galileo	NASA	1991年近距飞越S型主带小行星951 Gaspra, 1993年近距飞越S型主带小行星243 Ida, 并发现Ida的卫星Dactyl ^[3]
NEAR-Shoemaker	NASA	1997年近距飞越Cb型主带小行星253 Mathilde, 1998年近距飞越S型近地小行星433 Eros, 2000年与Eros交会进入环绕小行星轨道并于2001年着陆于Eros ^[4]
Deep Space 1	NASA	1999年近距飞越Q型近地小行星9969 Braille, 2001年近距飞越彗星19P/Borrelly ^[5,6]
Cassini	NASA	2000年近距飞越S型主带小行星2685 Masursky ^[7]
Stardust	NASA	2002年近距飞越S型主带小行星5535 Annefrank, 2004年近距飞越彗星81P/Wild 并采集了Wild彗发中的尘埃颗粒(样品舱于2006年返回再入地球大气层), 2011年近距飞越彗星9P/Tempel (观测到了NASA于2005年Deep Impact任务撞击该彗星后的地貌) ^[8,9]
Hayabusa	JAXA	2005年交会并着陆于S型近地小行星25143 Itokawa, 采集了Itokawa表面细微颗粒(样品舱于2010年返回再入地球大气层) ^[10]
New Horizons	NASA	2006年近距飞越S型主带小行星132524 APL, 2015年近距飞越柯伊伯带矮行星134340 Pluto, 计划2019年近距飞越柯伊伯带天体2014 MU ₆₉ ^[11]
Rosetta	ESA	2008年近距飞越E型主带小行星2867 Teins, 2010年近距飞越M型主带小行星21 Lutetia, 2014年与彗星67P/Churyumov-Gerasimenko交会进入环绕彗星轨道并释放着陆器Philae ^[12]
Dawn	NASA	2011年与V型主带小行星4 Vesta交会进入环绕小行星轨道, 2012年离开Vesta, 2015年与C型主带矮行星1 Ceres交会进入环绕矮行星轨道 ^[13]
Chang'E 2	CNSA	2012年近距飞越S型近地小行星4179 Toutatis ^[14]
Hayabusa 2	JAXA	探测器于2014年发射, 2018年与Cg型近地小行星162173 Ryugu交会实施采样任务并释放着陆器MASCOT, 2020年将样品返回地球 ^[15]
OSIRIS-REx	NASA	探测器于2016年发射, 2018年与B型近地小行星101955 Bennu交会, 2020年实施采样任务并于2023年将样品返回地球 ^[16]
Lucy	NASA	计划于2021年发射, 2025年近距飞越C型主带小行星52246 Donaldjohanson, 2027年至2033年近距飞越五颗不同光谱类型的木星特洛伊小行星
Psyche	NASA	计划于2023年发射, 2030年与M型主带小行星16 Psyche交会进入环绕小行星轨道

样。研究当前小行星的分布情况,有助于理解空间环境中影响小行星的静力学和动力学行为的物理机制,了解小行星的演化过程,从而揭示太阳系的演化历史。

小行星轨道分布蕴涵着太阳系早期星子形成、各大行星迁移的信息。截止至2018年6月30日,太阳系内已有正式编号的小行星数量达到了523584颗。图1展示了这些小行星的轨道半长轴与绝对星等的分布情况³⁾。可看出,大部分小行星运行于火星(半长轴约为1.5 AU)与木星(半长轴约为5.2 AU)之间的小行星主带。在太阳系形成初期(约45亿年前),原始行星盘中的气体和尘埃颗粒在环绕早期恒星的过程中通过撞击和引力作用聚集形成原始行星和原始小行星^[20,21]。而位于目前小行星主带附近的原始小行星受到原木星的引力摄动不能继续聚集形成大行星^[22,23]。随着大行星的迁移和摄动作用,原始小行星历经撞击演化过程,质量逐渐分散于不同轨道位置。轨道周期与木星轨道周期成整数比的小行星轨道在木星轨道共振作用下变得不稳定,形成小行星轨道半长轴分布的稀薄带,即Kirkwood空隙^[24](如图1所示)。这些不稳定的小行星轨道偏心率增大,被驱逐出主带,迁移至近地轨道,成为近地小行星^[25]。而与大行星的轨道共振也可产生稳定的轨道区域,例如位于日本系统L4、L5稳定拉格朗日点附近的木星特洛伊小行星,与木星轨道成3:2平运动共振的Hilda家族小行星^[26](如图1所示)。

小行星的大小分布记载了小行星带的撞击历史和演化过程。主带小行星的等效直径分布从数米到数百千米⁴⁾。其中,直径大于100 km的小行星仍保留着原始小行星的结构和物理性质,直径小于100 km的小行星则被认为是原始小行星撞击演化的产物^[28]。从同一原始小行星分裂的碎片具有着相似的化学组成和轨道分布,隐藏着小行星家族演化的线索^[29]。通过高速撞击数值模拟,对比小行星家族成员大小分布和轨道分布,可推知原始小行星的结构、轨道和撞击条件^[30,31]。但由于受到其他天体的引力和非引力摄动作用,如大行星的平运动共振、长期共振^[32,33]和Yarkovsky效应^[34],

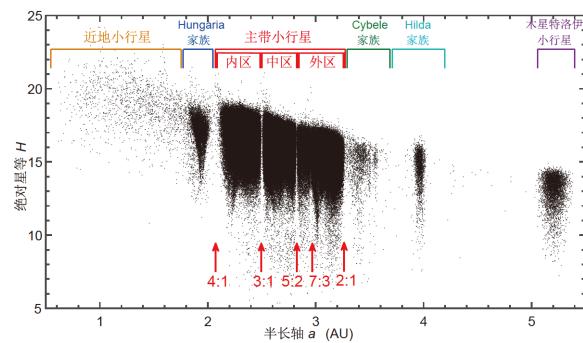


图1 (网络版彩图) 523584颗小行星(已有正式编号)轨道半长轴与绝对星等的分布

Figure 1 (Color online) Absolute magnitude H vs. orbital semi-major axis a of 523584 numbered asteroids.

目前所观测到的小行星家族成员分布与撞击分裂后的原始位置存在较大偏差^[35]。其中, Yarkovsky效应⁵⁾对直径小于数十千米的小行星影响较大^[36]。因此,主带中直径较小的小行星在Yarkovsky效应的影响下可能来到与木星轨道发生共振的不稳定轨道附近,从而远离原轨道,演化成近地小行星^[37](如图1所示)。

小行星的自旋速率分布保存着撞击演化过程的痕迹。小行星的自旋状态可通过分析其光变曲线获取^[27,38]。截止至2018年6月23日,光变曲线数据库中已记录超过20万颗小行星的自旋状态数据⁶⁾。图2统计了数据库中光变曲线质量优于2等(the quality of lightcurves, $U \geq 2$)的16075颗小行星的自旋周期与直径的分布情况,并突出显示了几类特殊的小行星(详见图例标注)。小行星在遭遇撞击后,系统角动量将部分转化为碎片的旋转角动量,改变其旋转状态^[39]。由于自身结构内部的能量耗散,撞击后生成碎片的非主轴方向的旋转角速度分量将在其后的演化过程中衰减,最终形成绕最大惯量主轴自旋的小行星^[40,41]。衰减过程的时间尺度与小行星大小和初始旋转速率相关^[42,43]。图2中的点画线标注了三个不同衰减时间尺度曲线,低于对应曲线的小行星需要更长的时间达到主轴自旋状态。因此,所观测到的大部分非主轴自旋小行星的旋转周

3) 数据来源: <http://hamilton.dm.unipi.it/astdys>

4) 小行星的等效直径 D 可由其绝对星等 H 和反照率 pV 推知,即 $\log(D) = 3.1235 - 0.2H - 0.5\log(pV)$ (单位: km)。反照率 pV 取决于小行星光谱类型,例如对于S型小行星有 $pV = 0.20 \pm 0.07$ ^[27]。鉴于小行星的不规则形状,后文提及小行星直径(或半径)时均指其等效直径(半径)。

5) 由于小行星不规则的外形和复杂的地表结构,被反射的太阳光以及二次辐射等相对星体质心具有不对称性,从而对小行星产生一个净力和净力矩的作用。通过长期积累,净力会对小行星的轨道半长轴产生影响,即为Yarkovsky效应;而净力矩则会改变小行星的自转轴指向以及自旋速率等,即为YORP效应。

6) 数据来源: <http://www.minorplanet.info/lightcurvedatabase.html>

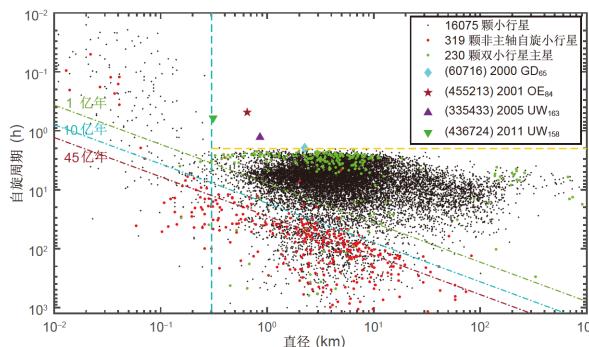


图2 (网络版彩图) 16075颗小行星(光变曲线质量优于2等)自旋周期-直径分布

Figure 2 (Color online) Spin period vs. diameter of 16075 asteroids whose lightcurve quality is not less than 2.

期很长,遭遇撞击后的演化时间尺度远远小于所需的非主轴旋转衰减时间尺度。此外,在YORP效应的长期影响下,一些直径小于数千米的小行星也可能进入非主轴自旋状态^[44,45]。从图2中可看出,除了几个特例之外,所有直径大于300 m的小行星的自旋周期均不小于2 h,且大部分双小行星的主星旋转状态非常接近于2 h(临界旋转极限)。这种特殊的分布形式暗示着这些小行星很可能是在引力作用下聚合在一起的碎石堆(rubble-pile aggregates),其松散的结构会因无法承受快速自旋时的离心力而变形或分裂^[46]。

3 小行星的结构演化

通过对小行星统计信息的分析,人类了解到小行星在45亿年的演化历程中主要经历了撞击、大行星引力摄动(如长期共振和平运动共振)、潮汐作用、太阳光压摄动(如Yarkovsky效应和YORP效应)等外部作用,并期望从这些机制的研究中更深入地了解小行星的结构演化情况。其中,最值得注意的就是发现了小行星很可能是由几毫米至几十米的石块在引力的作用下聚合构成的碎石堆结构体^[47]。

鉴于小行星剧烈的撞击历史,现存的小行星很可能是原始小行星经历撞击破碎和引力再聚合过程的产物^[48,49]。小行星撞击动力学中通常采用临界破碎比能 $Q_{S,\text{critical}}$ 和临界破坏比能 $Q_{D,\text{critical}}$ 两个指标⁷⁾来评价通过撞击破碎/破坏小行星结构的难易程度^[50,51]。前者对应

于能使小行星中50%的结构产生损伤的撞击比能量,后者对应于能使小行星失去50%质量的撞击比能。由于临界破坏比能 $Q_{D,\text{critical}}$ 要求小行星中的一半碎片到达撞击后最大剩余物质(即在撞击演化完成后,所产生的碎片通过引力再聚集过程形成的最大物质)的逃逸速度,其大小可由临界破碎比能 $Q_{S,\text{critical}}$ 和小行星的引力束缚能估计。而 $Q_{S,\text{critical}}$ 的估值则复杂得多,依赖于小行星和撞击者尺寸、材料以及撞击过程的应变率,一般通过实验推导经验公式^[52,53]。相关研究^[54,55]表明 $Q_{S,\text{critical}}$ 与小行星半径呈反比例关系:对于半径小于100 m的小行星, $Q_{S,\text{critical}}$ 较大,结构难以被破碎;而对于较大的小行星,虽然 $Q_{S,\text{critical}}$ 较小,但由于引力束缚能较大,结构则难以被破坏。因此,半径大于100 m的小行星容易被撞碎但不容易损失质量,从而能够发展成为主要以相互引力作用维持平衡的碎石堆结构。

具有碎石堆结构的小天体在近距飞越大行星时会被大行星施加的潮汐力撕裂。1992年,观测到彗星D/Shoemaker-Levy 9在近距飞越木星的过程中分裂成数十块碎片^[56]。Scotti和Melosh^[57]评估发现在D/Shoemaker-Levy 9分裂时受到的潮汐应力力量级约为10 Pa,即D/Shoemaker-Levy 9内部结构的拉伸强度低于10 Pa,暗示着其为碎石堆结构。1994年,从D/Shoemaker-Levy 9分裂的21块碎片依次进入木星大气层形成一系列的红色耀斑。类似的潮汐分裂事件在太阳系里屡见不鲜,例如2000年观测到的彗星C/1999 S4的分裂^[58]。一些大行星及其卫星表面的链状撞击坑也很可能是由类似过程产生^[59,60]。

对小行星物理性质的观测数据也提供了关于小行星碎石堆结构的直接和间接的证据。多数小行星体积密度较低,如小行星Eros的体积密度为2.67 g/cm³,仅为其构成材料密度的70%,表明其结构内部可能存在大量孔洞^[61];大部分直径大于300 m的小行星的自转周期不超过相应的碎石堆结构的临界旋转速度^[46,62](如图2所示);一般陨石材料在遭受高速撞击时材料会产生裂痕或完全破碎,而一些小行星表面形貌(如小行星Mathilde^[63], Ida^[64], Gaspra^[65])呈现出的巨型撞击坑,表明其内部为疏松多孔的结构,撞击能量可被撞击压实过程吸收,避免对整体结构的破坏^[66];部分小行星具有细长型结构(如小行星Eros^[67], Toutatis^[68], 1620

7) 在本文中,小行星撞击事件中的撞击比能定义为撞击者的撞击动能与撞击者和目标天体总质量之比。

Geographos^[69], 216 Kleopatra^[70], 4769 Castalia^[71] 等), 可能是由原类球体碎石堆在自旋离心力或者大行星潮汐力作用下变形形成^[72]. 进入20世纪后, 多个小行星探测任务(如NEAR-Shoemaker, Hayabusa与Hayabusa 2, OSIRIS-REx等)陆续返回了小行星表面的高清图像^[73,74], 进一步证实了小行星的碎石堆结构.

4 碎石堆小行星的研究进展

小行星碎石堆结构的提出和证实, 不仅解释了所观测到的小行星的物理性质和天文现象, 还对小行星探测任务以及相关研究提出了诸多挑战, 使碎石堆结构的相关研究成为了亟待解决的科学问题.

具有碎石堆结构的小行星内部疏松多孔, 整体材料的剪切强度、拉伸强度较低. 同时, 由于小行星的引力场较弱, 整体结构容易在强力的作用下变形甚至破碎瓦解. 例如日本的Hayabusa号探测器曾经造访的碎石堆小行星Itokawa, 其质量约为 3.5×10^{10} kg, 最长半长轴轴长约为270 m, 相应的表面逃逸速度约为0.17 m/s——这意味着, 只要当颗粒相对表面运动速度高于0.17 m/s时就能够飞离该小行星. 因此, 在对碎石堆小行星进行探测时, 需要非常小心以确保探测器的安全和任务的成功. 假若锚定或开采时产生的力或振动导致小行星表面物质飞溅脱离, 就很有可能会对探测器造成撞击威胁; 而探测器在没有锚定的情况下也非常容易飞离小行星. 这就需要对碎石堆小行星力学特性进行建模和仿真分析, 为安全可靠地完成探测任务(如锚定、着陆、挖掘、采样收集、起飞等)提供理论依据.

此外, 由于缺乏对小行星内部结构的观测数据, 与完整结构相比, 碎石堆结构存在更多不确定因素, 如孔隙率大小分布、颗粒大小分布、颗粒构型排布等, 而组成颗粒之间的相互作用也是影响整体结构强度和稳定性关键因素. 这些不确定因素必然对小行星结构演化过程产生影响, 动力学过程和物理机制是理解小行星演化过程所必须研究清楚的科学问题^[75].

4.1 碎石堆结构特点和动力学响应特性

在分析对比了小行星的各种可能结构的基础上, Richardson等人^[47]提出小行星可视为具有碎石堆结构(rubble-pile structure)应满足如下条件: 结构由大量固

体碎块组成, 体积孔隙率较高($\geq 30\%$), 拉伸强度较低或为零, 束缚各个碎块聚集在一起的主要作用力为相互引力. 根据此定义, 碎石堆结构的小行星从物质形态上可归类为散体, 即颗粒材料(granular materials), 其结构特点和动力学响应特性与地球上常见的颗粒物质(如黏土、沙石等)类似.

颗粒材料的力学行为与目前研究得较为广泛的固体、液体和气体有很大的不同. 组成颗粒材料的固体颗粒间的相互作用以强耗散的接触摩擦为主. 原静止的颗粒介质在外力作用下没有发生流动时表现出的宏观性质与固体类似; 开始流动后其表现出的宏观性质又与液体(如稠密颗粒流动状态)或气体(如快速稀疏颗粒流动状态)类似^[76]. 但颗粒介质在静止时的力学性质又与一般固体不同, 流动时的性质也与一般流体不同. 建立适用于描述不同状态的颗粒介质本构模型, 了解和量化颗粒介质变形过程和失稳机理, 是目前颗粒材料理论研究的前沿课题之一^[77-79]. 近三十年来, 通过对颗粒物质体系开展大量实验观测和数值模拟研究, 人类认识到颗粒材料结构具有自组织行为及对外界微小扰动的敏感性、非线性响应等基本特性. 这些特性使得颗粒材料体系展现出特殊的静力学和动力学现象, 例如粮仓效应^[80](当粮仓内颗粒堆积高度大于两倍底面直径后, 粮仓底面压强不变, 重力方向的力通过颗粒间的接触被分解到水平方向, 由粮仓边壁支撑)、振动对流现象^[81,82](颗粒混合物在振荡作用下根据颗粒的物理性质发生分层和聚集)、巴西果效应^[83,84](“Brazil-nut effect”, 混杂于小颗粒系统中的大颗粒会在振荡作用下移动到整体颗粒系统表面)、剪切膨胀现象^[85](颗粒体系在承受剪切加载过程中体积发生膨胀)等.

颗粒材料体系的静力学和动力学过程与小行星所处环境共同作用, 推动小行星表面和内部的各种地质过程的发展, 形成了当前的小行星结构. 相关研究人员通过借鉴颗粒固体材料和岩土力学的研究方法, 将颗粒材料的力学特性与目前所观测到的小行星物理特征相联系, 在一定程度上揭示了碎石堆小行星的结构特性和演化过程.

碎石堆小行星在诞生和演化过程中频繁地受到不同大小的天体的撞击. 撞击作用不仅能够破坏小行星的结构, 还能够极大地改变小行星的形状、地表形貌和颗粒分布. Michel和Richardson^[86]模拟了原结构完

整的球形小行星被大小量级相近的天体高速撞击后的破碎和引力再聚集过程, 结果显示撞击后最大剩余物质最终发展成为不规则的细长形碎石堆结构(形状与Itokawa相似). Leinhardt等人^[87]模拟了两颗球形碎石堆小行星低速相撞过程, 通过调整撞击方位角、撞击相对速度和撞击者的旋转状态获得了形状多样的最大剩余物质, 其中包括细长形状和接触双小行星形状. Szabo和Kiss^[88]对小行星形状观测数据进行了统计, 发现年轻的(即撞击形成后的演化时间距离当前时间较短)小行星家族中的大部分成员均具有细长形状, 而较年长的家族中的近球形成员比例较高. 这表明后续演化过程中遭受的其他作用对碎石堆小行星形状具有球化效果. 其中之一就是流星体的撞击作用. 与其他撞击事件相比, 质量较小的流星体的高速撞击对小行星地表形貌, 例如在表面造成陨石坑^[89]. 由于碎石堆结构的高孔隙率和强耗散作用, 流星体撞击后喷射物质的向外喷射速度较低, 部分喷射物质会重新覆盖于小行星表面^[90,91], 从而可能掩盖撞击历史并改变小行星的表面颗粒分布^[92]. 相似过程很可能是导致碎石堆小行星(如Eros)表面缺乏小型撞击坑的原因^[93]. 流星体撞击过程中产生的冲击波还会激发附近区域的振动, 导致局部区域滑坡甚至崩塌^[94]. Korycansky和Asphaug^[95]的研究表明多次流星体撞击作用引发的地质运动能够改变小行星的整体形状, 使其朝扁球形发展. 当地质运动较为剧烈时还会引发小行星局部或整体结构的长期地质震动, 在表面和内部结构产生振动对流现象和巴西果效应, 使得颗粒按尺寸、质量以及其他性质在重力作用下偏析, 内部的较大颗粒迁移至小行星表面^[96,97]. Eros^[98]和Itokawa^[99]表面分布的大石块极可能由此过程形成.

碎石堆小行星在近距飞越大行星时, 大行星施加的潮汐应力可能激发小行星表面和内部的地质运动. Yu等人^[100]模拟了小行星99942 Apophis接近地球时表面风化层在潮汐作用下的运动情况, 发现近地飞越将引发其表面风化层的崩塌, 能够重塑小行星表面地貌. 更为剧烈的潮汐作用还能够改变小行星的形状^[101], 撕碎小行星形成双小行星系统^[102]甚至形成小行星家族^[103]. 碎石堆小行星自身的潮汐作用也会增强结构内部的能量耗散, 使其更快地达到主轴自转状态^[42,43]. 而碎石堆结构多小行星系统中, 主星对于从星的潮汐力

也是使该系统能够稳定运行的机制. Jacobson和Scheeres^[104]推导了碎石堆结构双星系统中的潮汐作用对从星轨道半长轴和偏心率的影响关系式, 发现联合双星YORP效应, 从星的自转运动将逐渐与其绕主星的轨道运动互锁, 并能够达到稳定平衡运动状态^[105]. 在所有影响小行星演化的缓慢机制(即短时间内造成的影响非常微弱的作用, 如与太阳光压相关的作用、太空风化作用等)中, YORP效应对小行星结构和旋转状态的演化有着至关重要的作用. 而碎石堆小行星的表面高粗糙度、密度分布强不均匀性等特性能够大幅度改变YORP效应的作用形式和效率. Statler^[106]计算了不同表面形貌的YORP效应力矩, 发现微小的改动(如移动表面石块位置、改变石块大小等)就会引起YORP效应力矩幅值的剧烈波动甚至导致力矩作用方向的反转. 以小行星Itokawa的密度分布特征为例, Scheeres和Gaskell^[107]评估了密度分布对YORP效应的影响, 发现当小行星的质心和形心重合时YORP效应能够加速小行星自旋, 而不重合时将可能减速. 此外, 由于碎石堆结构的低强度特性, YORP加速效应还可能导致小行星的结构发生失效^[108]、表面滑坡^[109]、变形^[110]或分裂^[111]. 碎石堆小行星在YORP效应作用下的演化机制能够较好地解释目前观测到的小行星表面形貌特征, 并在一定程度上能揭示小行星的内部结构, 同时也是解释多小行星系统形成原因的有效机制之一, 至今仍是行星科学领域的研究热点.

4.2 碎石堆结构的研究方法评述

碎石堆小行星自身及其与空间环境的耦合作用表现出特殊的静力学和动力学行为, 吸引着研究者们不断去思考和探索. 目前相关研究主要从理论分析, 实验探索和数值模拟三个方面展开. 表2列出了这三种研究方法的特点和适用范围.

4.2.1 理论分析

在碎石堆小行星研究的初期阶段, 为了理解小行星不规则形状的形成和演化过程, 研究人员通过借鉴经典的流体理论来讨论小行星在各个动力学过程中形状的平衡性及变化趋势^[112-114]. 但由于所考虑的流体本构方程与实际构成小行星的岩石、砂砾等固体、颗粒材料的力学特征差别较大, 所获得的大多数平衡构型并不稳定, 且存在分岔行为, 相应理论对于碎石堆

表 2 碎石堆结构小行星研究方法对比**Table 2** Comparison of methods in rubble-pile asteroids study

研究方法	典型代表	经济代价	时间代价	适用领域
理论分析	流体、固体及运动稳定性理论	N	N	结构平衡性与稳定性分析
	微重力实验	中、高	中、高	颗粒材料流动与低速碰撞
	高速撞击实验	高	中	固体及颗粒材料的高速碰撞
数值模拟	有限元法	较低	较低	结构应力分布和小变形问题
	无网格法	较低	中	结构超高速碰撞和裂纹扩展问题
	离散元法	较低	较高	结构低速碰撞、平衡稳定性分析与应力分布和变形

小行星不具有参考价值^[15,16]. 其后, 通过借鉴固体材料的研究方法, 相关研究尝试在分析中考虑结构材料强度的作用. Davidsson^[17]推导了不同形状的椭球形小天体的结构拉伸强度与其Roche极限(即在其他天体附近时, 小天体自身结构能够不被其他天体的引力潮汐作用拉碎的最近距离)的关系. Holsapple^[18,19]采用岩土材料的本构模型、屈服条件和流动准则研究了椭球形小天体的平衡构型与旋转速度的关系, 并应用虚功原理和Lyapunov稳定性判据分析了平衡构型的稳定性. 基于相似的岩土材料模型, Sharma等人^[10,12,12]采用体积平均的方法分析了椭球形碎石堆小行星在近距飞越大行星和自转加速过程中的变形路径, 并从Lagrange-Dirichlet稳定性理论的角度阐述了平衡构型的稳定性.

随着与碎石堆小行星相关的观测数据和探测数据的丰富, 相关研究还从碎石堆小行星自身的结构特点展开. Goldreich和Sari^[22]分析了小行星结构刚度对双小行星系统中的潮汐作用的影响, 发现碎石堆结构的空隙可导致应力集中并能够大幅度降低整体结构刚度, 使得潮汐作用加强, 提升了双小行星系统的稳定性. Holsapple^[16,123]则在研究中考虑了碎石堆小行星组成颗粒间可能存在的黏附作用, 讨论了小行星平衡构型与其自转速度、剪切强度和黏附强度的关系. Hirabayashi^[108,124,125]进一步研究了密度分布不均匀性和黏附强度分布不均匀性对小行星在旋转加速作用下的结构失效条件和失效模式的影响.

这些基于岩土力学的理论分析方法, 具有严谨的数学推导, 分析过程较为简单且非常高效, 并能够较好地解释观测数据, 还提供了对小行星结构特性定性分析方面的数据. 但由于在分析过程中极大地简化了

小行星结构模型和相关动力学过程, 弱化了碎石堆结构的离散特性, 忽视了碎石堆结构的强不规则性和微观不均匀性, 得到的结论不能直接应用于真实小行星的定量分析当中. 此外, 因理论分析方法本身的局限性, 不能推演实际小行星结构在动力过程中的发展, 涉及旋转分裂、撞击等高应变率、大变形过程的动力学问题只能依靠实验探索和数值模拟.

4.2.2 实验研究

虽然直接针对碎石堆小行星开展实验难度很大, 但可从颗粒材料的实验研究中了解其动力学规律. 国内外相关领域的研究人员开展了大量实验来研究颗粒物质体系的动力学过程, 对其在外力作用下的自组织、分层结构和聚集现象有了一定的认识, 并提出了可以解释部分实验现象的理论模型^[126-129]. 但这些实验均在地球重力条件下开展, 不能直接用于研究处于微重力条件下的碎石堆小行星. 落塔试验(drop tower)通过控制放置样品的试验台的升降加速度, 可短时间内实现各种微重力条件, 是开展微重力实验研究的有效手段之一. 例如, Hofmeister等人^[130]利用落塔研究了微重力下的颗粒物质流动现象; Beitz等人^[131]应用落塔探究了微重力下的颗粒物质低速撞击过程. 此外, 按经济成本从低到高排序, 开展微重力实验的方法还包括抛物线飞行实验^[132,133], 探空火箭实验^[134]以及在国际空间站开展实验^[135].

大量微重力实验显示重力对颗粒物质的静力学和动力学行为有着重要影响. 例如, Murdoch等人^[96,133]研究了不同程度的重力驱动下的散体对流行为, 发现在微重力情况下散体粒子几乎不发生二次流现象, 随着重力的增大二次流现象会增强, 而主流不受重力影响,

由此认为重力的大小会改变粒子间、粒子与接触面间的摩擦作用力, 从而影响二次流; Altshuler等人^[136]研究了重力对球形自由落体撞入颗粒介质运动中的沉降深度、沉降时间的影响, 发现沉降深度与外部重力条件无关, 但沉降时间与外部重力场大小呈反比。此外, 了解高速撞击过程中的结构动力学响应和动量传递效率也是小行星实验研究的重点内容^[137-140]。

相关实验研究发现有助于理解碎石堆小行星的撞击演化以及内部和表面的地质运动过程, 并可指导小行星表面探测活动的开展(例如, NASA OSIRIS-REx任务计划通过采样机械臂冲击小行星表面来收集样品^[16])。但由于受到经济、实验条件及测量技术的制约, 实验方法在参数选取和控制上具有不可避免的局限性, 同时也不能完全解释颗粒材料一些复杂动力学过程的机理, 而且实验的时间、空间尺度与一般碎石堆小行星差别较大, 因此研究中还须结合数值模拟的方法, 通过实验对模拟结果进行校正, 进而可将合适的数值模型用于对应碎石堆结构的模拟场景中。

4.2.3 数值模拟

随着计算机软硬件技术的突飞猛进, 数值模拟在碎石堆小行星研究中的地位日益上升。其成本较低, 可控性好, 易于后期处理分析, 且在一定程度上能够揭示一些动力过程的影响因素。从基本原理上区分, 常用的数值模型包括基于连续介质理论和基于离散介质理论的两种体系, 即连续介质理论模型和离散动力学模型。前者通过平均各个颗粒的物理性质, 采用光滑连续函数来描述碎石堆结构中的物理变量; 后者将碎石堆结构视为由离散的个体颗粒组成的集合体, 细致地描述了颗粒间的相互作用, 能够反映碎石堆结构的离散本质。

依据对物理控制方程描述方法的不同, 连续介质理论模型可分为基于网格的方法和无网格质点类方法。传统的基于拉格朗日网格的方法如有限元法(Finite Element Method, FEM)已广泛地应用于碎石堆小行星结构应力分布和小变形问题的分析中^[141-143]。此外, 通过结合拉格朗日描述和欧拉描述的优点, 网格类方法还能够求解多尺度、大变形、强冲击载荷作用的结构动力学行为, 如美国圣地亚国家实验室(Sandia National Laboratories)开发的CTH软件系统^[144]能够有效求解小行星超高速撞击动力学问题^[145-147]。但因受

限于网格划分和重构过程, 网格类方法难以实现较高的计算精度和效率, 而无网格质点类方法采用基于点的近似, 不依赖于网格, 适用于模拟各种复杂三维结构的高速碰撞、动态断裂、塑性流动等动力过程^[148]。目前在处理碎石堆结构小行星的超高速碰撞、裂纹扩展等问题的数值模拟中应用较为成功的主要有光滑质点流体动力学法(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)^[149-152]和物质点法(Material Point Method, MPM)^[153]。

尽管基于连续介质理论的数值方法在碎石堆小行星研究中已经获得了广泛的应用, 但其平均化的处理方式无法体现颗粒材料的微观结构特征^[154], 在研究以颗粒间相互接触作用为主的动力学过程(如准静态过程、缓慢变形过程、低速碰撞过程等)中需要应用离散动力学方法(也称离散元法, Discrete Element Method, DEM)。该方法以牛顿第二定律为基础, 最早由Cundall和Strack^[155]提出和发展。所研究的对象是大量具有特定形状的离散颗粒(通常为球体, 一般不考虑物理量在单颗粒上的不均匀性), 每个颗粒具有一定的自由度, 颗粒间通过接触力、摩擦力和黏附力相互作用, 同时也可施加外力、外力场或位移的边界条件进行限制。在离散动力学模型中, 颗粒物质系统的真实分布情况能够被最大限度地保留, 模拟场景中的每个粒子及其所受外力作用可与现实中的颗粒一一对应。行星科学领域的一些研究人员将引力N体数值积分方法与离散动力学结合, 发展出了适用于研究碎石堆小行星的数值模拟方法。下一节将详细地论述相关模型的发展及其具体应用。

4.3 碎石堆结构的离散动力学模型研究现状

针对碎石堆小行星的离散动力学数值模拟研究始于20世纪90年代, 当时主要采用硬球模型(Hard Sphere Discrete Element Method, HSDEM)求解颗粒间的碰撞。模型中将研究的颗粒视为刚体, 忽略碰撞过程的接触变形等细节, 直接根据恢复系数和相撞颗粒的运动状态来求解碰撞后的状态, 适合于处理仅存在二体碰撞的快速稀疏颗粒流问题^[156,157]。由于硬球模型中的积分步长为颗粒自由程相应时间, 能够结合引力N体问题中变步长积分方法的优势, 具有较高的积分效率。Richardson等人^[158]运用硬球模型的离散元数值方法, 并采用四阶预估校正方法进行引力积分, 用247个粒子

构建碎石堆小行星模型, 研究在木星潮汐力作用下的演化情况. 在此基础上, Leinhardt等人^[87]采用并行数据结构和蛙跳引力积分方法来搜寻碰撞和计算球体的轨迹, 进一步提高了算法效率, 模拟了两个碎石堆小行星低速撞击的过程, 模型粒子个数达到了 10^3 量级. 为了能够模拟稠密颗粒体系, Richardson等人^[110]将相对撞击速度低于10%逃逸速度的相撞颗粒间的恢复系数设为1, 避免了因多体碰撞引起的数值求解困难, 并采用该方法研究了碎石堆小行星旋转角速度与形状的关系. Walsh等人^[159]采用相同的模型, 仿真了一颗具有一定形状的碎石堆小行星在YORP效应作用下加速旋转时在赤道处飞射出物质的现象, 并得出结论: 若此飞射物质因碰撞而产生能量耗散, 则会被吸进它的卫星中, 演化成双星. 该研究所获得的双星结构与双小行星系统1999 KW4相似, 在YORP效应双星生成机制研究中具有里程碑意义.

硬球模型本质上不适合于模拟稠密颗粒流的行为, 应用在模拟紧密聚集的颗粒物质时需要一些脱离实际的假设以避免发生多球同时碰撞的情况. 这些简化假设忽略了颗粒物质的表面变形, 不能够施加有效的摩擦阻力, 不适合于处理具有复杂接触现象的颗粒流. 因此, 虽然硬球模型具有较高的积分效率, 但在碎石堆的模拟中无论是仿真程度上还是算法的稳定性上都有明显的缺陷, 在近几年的研究中已较少使用. 软球模型(Soft Sphere Discrete Element Method, SSDEM)可弥补这一缺陷. 软球模型根据粒子交叠和相对变形的程度刻画相互间的接触力和摩擦力及力矩, 通过积分每个粒子的运动方程推演整个颗粒系统^[155]. 软球模型虽然在效率上远小于硬球模型, 但其处理方式接近客观的颗粒接触过程, 近几年来开始在碎石堆小行星研究领域得到了应用. 例如, Sánchez和Scheeres^[160]采用软球模型模拟对比了球形和椭球形碎石堆小行星在旋转加速过程中的行为; Ballouz等人^[161]利用软球模型研究了两颗碎石堆小行星低速碰撞过程中旋转速度的变化; Schwartz等人^[162]使用软球模型研究了JAXA Hayabusa 2的小行星表面采样机制; Perera等人^[163]采用软球模型探究了碎石堆结构整体的振荡对流行为. 同时, 由于软球模型的框架易于嵌套各种接触力模型, 研究中还可针对所研究问题的特点进行相应的调整. 例如, Schwartz等人^[164]基于颗粒间的烧结力(sintering force)机制, 在软球模型接触力的基础上加入了黏合力;

Zhang等人^[165]通过引入特殊的扭转和滚动摩擦机制, 提出了适用于模拟准静态过程中的碎石堆结构的软球模型; 随着对小行星结构和所处环境特点的知识的累积, 近几年来考虑了分子间范德华作用力的软球模型也被提出和使用到小行星结构的演化模拟中^[166,167]. 此外, 软球模型力学描述清晰, 能够较便捷地与其他力学模拟方法结合. 例如, Schwartz等人^[168]采用软球模型与无网格方法模拟了原始星体遭遇高速撞击作用的演化过程, 所得结果揭示了双叶形小天体的一种形成机制.

离散动力学数值研究方法中的软球模型从颗粒接触模型出发, 能够复现颗粒物质现象, 并能提取颗粒体系内部力学信息, 有助于从本质上理解颗粒物质行为特征, 是目前对碎石堆结构静力学和动力学特征描述准确程度最高的数值模型, 在碎石堆小行星数值研究中具有广阔的应用前景.

5 总结与展望

当代科学的研究要求研究者们必须冲破原有研究领域的思维方式和基本方法, 采用多学科交叉的方式来解决问题. 关于小行星结构演化的研究就是这样, 面对由天文观测技术提供的各种形式的数据, 仅采用传统天体力学和天体物理理论知识只能窥见一斑, 需要结合相关材料的力学与动力学理论, 并开展相应的实验和数值模拟研究, 才有可能厘清这些物理现象背后的机理.

小行星碎石堆结构的发现和证实在行星科学领域中催生了大量的新兴研究热点, 日益受到国内外相关领域研究机构的重视, 研究成果也在*Science*和*Nature*等具有重要影响力的期刊上不断涌现. 过去三十年的研究使得各领域对碎石堆小行星的认识有了长足的进步, 但目前尚未建立任何完整的理论体系. 例如, 相比于完整结构双小行星系统稳定性而言, 碎石堆结构的双小行星系统间的能量和动量传输会受到组成结构颗粒间的强耗散性的影响, 系统的稳定性以及演化方向还没有完全阐明.

无论是对太阳系起源的探索还是对实现人类文明迈向太空的构想来说, 对小行星开展科学研究并实施探测任务是非常关键的一步, 而对小行星的结构及其力学响应特性的深入理解则是走好这一步的基础.

参考文献

- 1 Michel P. Formation and physical properties of asteroids. *Elements*, 2014, 10: 19–24
- 2 Tsiganis K. Planetary science: How the Solar System didn't form. *Nature*, 2015, 528: 202–204
- 3 Monet A K B, Stone R C, Monet D G, et al. Astrometry for the Galileo mission. 1: Asteroid encounters. *Astron J*, 1994, 107: 2290–2294
- 4 Prockter L, Murchie S, Cheng A, et al. The NEAR Shoemaker mission to asteroid 433 Eros. *Acta Astronaut*, 2002, 51: 491–500
- 5 Buratti B J, Hicks M D, Soderblom L A, et al. Deep Space 1 photometry of the nucleus of Comet 19P/Borrelly. *Icarus*, 2004, 167: 16–29
- 6 Buratti B J, Britt D T, Soderblom L A, et al. 9969 Braille: Deep Space 1 infrared spectroscopy, geometric albedo, and classification. *Icarus*, 2004, 167: 129–135
- 7 Kempf S, Srama R, Altobelli N, et al. Cassini between Earth and asteroid belt: First *in-situ* charge measurements of interplanetary grains. *Icarus*, 2004, 171: 317–335
- 8 Duxbury T C, Newburn R L, Acton C H, et al. Asteroid 5535 Annefrank size, shape, and orientation: Stardust first results. *J Geophys Res-Planets*, 2004, 109: E02002
- 9 Tsou P. Stardust encounters comet 81P/Wild 2. *J Geophys Res*, 2004, 109: E12S01
- 10 Yoshikawa M, Kawaguchi J, Fujiwara A. Hayabusa sample return mission. In: Michel P, DeMeo F, Bottke W, eds. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona, 2015. 397–418
- 11 Guo Y, Farquhar R W. New horizons mission design. *Space Sci Rev*, 2008, 140: 49–74
- 12 Jewitt D. When the dust has settled. *Nat Phys*, 2015, 11: 96–97
- 13 Russell C T, Raymond C A. The dawn mission to vesta and ceres. *Space Sci Rev*, 2011, 163: 3–23
- 14 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
- 15 Tsuda Y, Yoshikawa M, Abe M, et al. System design of the Hayabusa 2-Asteroid sample return mission to 1999 JU3. *Acta Astronaut*, 2013, 91: 356–362
- 16 Gal-Edd J, Chevront A. The OSIRIS-REx asteroid sample return: Mission operations design. In: IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2015. 1–9
- 17 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. *Adv Space Res*, 2016, 57: 2529–2547
- 18 Asphaug E. Growth and evolution of asteroids. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2009, 37: 413–448
- 19 Michel P, DeMeo F E, Bottke W F. Asteroids: Recent advances and new perspectives. In: Michel P, DeMeo F, Bottke W, eds. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona, 2015. 3–10
- 20 Morbidelli A, Lunine J I, O'Brien D P, et al. Building terrestrial planets. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2012: 251–275
- 21 Martin R G, Livio M. On the formation and evolution of asteroid belts and their potential significance for life. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2013, 428: L11–L15, arXiv: [1211.0023](https://arxiv.org/abs/1211.0023)
- 22 O'Brien D P, Morbidelli A, Bottke W F. The primordial excitation and clearing of the asteroid belt-revisited. *Icarus*, 2007, 191: 434–452
- 23 O'Brien D P, Sykes M V. The origin and evolution of the asteroid belt-Implications for vesta and ceres. *Space Sci Rev*, 2011, 163: 41–61
- 24 Kirkwood D. Meteoric astronomy: A treatise on shooting-stars, fireballs, and aerolites. Lippincott: Kessinger Publishing, 1867
- 25 Bottke W F, Vokrouhlický D, Nesvorný D. An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. *Nature*, 2007, 449: 48–53
- 26 Barucci M A, Cruikshank D P, Mottola S, et al. Physical properties of trojan and centaur asteroids. In: Bottke W F, Cellino A, Paolicchi P, et al., eds. Asteroids III. Tucson: University of Arizona, 2002. 273–287
- 27 Warner B D, Harris A W, Pravec P. The asteroid lightcurve database. *Icarus*, 2009, 202: 134–146
- 28 Bottke Jr W F, Durda D D, Nesvorný D, et al. The fossilized size distribution of the main asteroid belt. *Icarus*, 2005, 175: 111–140
- 29 DeMeo F E, Carry B. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 2014, 505: 629–634, arXiv: [1408.2787](https://arxiv.org/abs/1408.2787)
- 30 Michel P, Benz W, Tanga P, et al. Collisions and gravitational reaccumulation: Forming asteroid families and satellites. *Science*, 2001, 294: 1696–1700
- 31 Benavidez P G, Durda D D, Enke B L, et al. A comparison between rubble-pile and monolithic targets in impact simulations: Application to

- asteroid satellites and family size distributions. *Icarus*, 2012, 219: 57–76
- 32 Morbidelli A, Nesvorný D. Numerous weak resonances drive asteroids toward terrestrial planets orbits. *Icarus*, 1999, 139: 295–308
- 33 Nesvorný D, Morbidelli A, Vokrouhlický D, et al. The Flora family: A case of the dynamically dispersed collisional swarm? *Icarus*, 2002, 157: 155–172
- 34 Farinella P, Vokrouhlický D. Semimajor axis mobility of asteroidal fragments. *Science*, 1999, 283: 1507–1510
- 35 Carruba V, Nesvorný D, Aljbaae S, et al. On the oldest asteroid families in the main belt. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 458: 3731–3738, arXiv: 1603.00818
- 36 Delbo' M, dell'Oro A, Harris A W, et al. Thermal inertia of near-Earth asteroids and implications for the magnitude of the Yarkovsky effect. *Icarus*, 2007, 190: 236–249, arXiv: 0704.1915
- 37 Bottke W F, Morbidelli A, Jedicke R, et al. Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-earth objects. *Icarus*, 2002, 156: 399–433
- 38 Polishook D, Brosch N. Photometry and spin rate distribution of small-sized main belt asteroids. *Icarus*, 2009, 199: 319–332, arXiv: 0811.1223
- 39 Giblin I, Farinella P. Tumbling fragments from experiments simulating asteroidal catastrophic disruption. *Icarus*, 1997, 127: 424–430
- 40 Burns J A, Safronov V S, Gold T. Asteroid nutation angles. *Mon Not R Astron Soc*, 1973, 165: 403–411
- 41 Samarasinha N H. Rotational excitation and damping as probes of interior structures of asteroids and comets. *Meteorit Planet Sci*, 2008, 43: 1063–1073
- 42 Harris A W. Tumbling asteroids. *Icarus*, 1994, 107: 209–211
- 43 Pravec P, Harris A W, Scheirich P, et al. Tumbling asteroids. *Icarus*, 2005, 173: 108–131
- 44 Vokrouhlický D, Breiter S, Nesvorný D, et al. Generalized YORP evolution: Onset of tumbling and new asymptotic states. *Icarus*, 2007, 191: 636–650
- 45 Breiter S, Rožek A, Vokrouhlický D. Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack effect on tumbling objects. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 417: 2478–2499
- 46 Harris A W. The rotation rates of very small asteroids: Evidence for “rubble-pile” structure. In: Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 1996. 493–494
- 47 Richardson D C, Leinhardt Z M, Melosh H J, et al. Gravitational aggregates: Evidence and evolution. In: Bottke W F, Cellino A, Paolicchi P, et al., eds. Asteroids III. Tucson: University of Arizona, 2002. 501–515
- 48 Chapman C R. Asteroid collisions, craters, regolith, and lifetimes. In: Morrison D, Wells W C, eds. Asteroids: An Exploration Assessment. Chicago: NASA Conference Publication, 1978. 2053
- 49 Melosh H J, Ryan E V. Asteroids: Shattered but not dispersed. *Icarus*, 1997, 129: 562–564
- 50 Davis D R, Chapman C R, Greenberg R, et al. Collisional evolution of asteroids: Populations, rotations and velocities. In: Gehrels T, eds. Asteroids. Tucson: University of Arizona, 1979. 528–557
- 51 Benz W, Asphaug E. Impact simulations with fracture. I. Method and tests. *Icarus*, 1994, 107: 98–116
- 52 Housen K R, Holsapple K A. Scale effects in strength-dominated collisions of rocky asteroids. *Icarus*, 1999, 142: 21–33
- 53 Holsapple K A, Giblin I, Housen K R, et al. Asteroid impacts: Laboratory experiments and scaling laws. In: Bottke W F, Cellino A, Paolicchi P, et al., eds. Asteroids III. Tucson: University of Arizona, 2002. 443–462
- 54 Love S G, Ahrens T J. Catastrophic impacts on gravity dominated asteroids. *Icarus*, 1996, 124: 141–155
- 55 Durda D D, Greenberg R, Jedicke R. Collisional models and scaling laws: A new interpretation of the shape of the main-belt asteroid size distribution. *Icarus*, 1998, 135: 431–440
- 56 Martin T Z, Orton G S, Travis L D, et al. Observation of Shoemaker-Levy impacts by the Galileo photopolarimeter radiometer. *Science*, 1995, 268: 1875–1879
- 57 Scotti J V, Melosh H J. Estimate of the size of comet Shoemaker-Levy 9 from a tidal breakup model. *Nature*, 1993, 365: 733–735
- 58 Weaver H A, Sekanina Z, Toth I, et al. HST and VLT investigations of the fragments of comet C/1999 S4 (LINEAR). *Science*, 1999, 292: 1329–1333
- 59 Schenck P M, Asphaug E, McKinnon W B, et al. Cometary nuclei and tidal disruption: The geologic record of crater chains on Callisto and Ganymede. *Icarus*, 1996, 121: 249–274
- 60 Bottke Jr. W F, Richardson D C, Love S G. Can tidal disruption of asteroids make crater chains on the earth and moon? *Icarus*, 1997, 126: 470–

- 61 Britt D T, Yeomans D, Housen K, et al. Asteroid density, porosity, and structure. In: Bottke W F, Cellino A, Paolicchi P, et al., eds. *Asteroids III*. Tucson: University of Arizona, 2002. 485–500
- 62 Pravec P, Harris A W. Fast and slow rotation of asteroids. *Icarus*, 2000, 148: 12–20
- 63 Chapman C R, Merline W J, Thomas P. Cratering on Mathilde. *Icarus*, 1999, 140: 28–33
- 64 Chapman C R, Ryan E V, Merline W J, et al. Cratering on Ida. *Icarus*, 1996, 120: 77–86
- 65 Chapman C R, Everka J, Belton M J S, et al. Cratering on Gaspra. *Icarus*, 1996, 120: 231–245
- 66 Britt D T, Consolmagno S. J. G. J. Modeling the structure of high porosity asteroids. *Icarus*, 2001, 152: 134–139
- 67 Miller J K, Konopliv A S, Antreasian P G, et al. Determination of shape, gravity, and rotational state of asteroid 433 Eros. *Icarus*, 2002, 155: 3–17
- 68 Ostro S J, Hudson R S, Rosema K D, et al. Asteroid 4179 Toutatis: 1996 radar observations. *Icarus*, 1999, 137: 122–139
- 69 Ostro S J, Rosema K D, Hudson R S, et al. Extreme elongation of asteroid 1620 Geographos from radar images. *Nature*, 1995, 375: 474–477
- 70 Ostro S J, Hudson R S, Nolan M C, et al. Radar observations of asteroid 216 Kleopatra. *Science*, 2000, 288: 836–839
- 71 Hudson R S, Ostro S J. Shape of asteroid 4769 Castalia (1989 PB) from inversion of radar images. *Science*, 1994, 263: 940–943
- 72 Tanga P, Comito C, Paolicchi P, et al. Rubble-pile reshaping reproduces overall asteroid shapes. *Astrophys J*, 2009, 706: L197–L202
- 73 Everka J, Farquhar B, Robinson M, et al. The landing of the NEAR-Shoemaker spacecraft on asteroid 433 Eros. *Nature*, 2001, 413: 390–393
- 74 Fujiwara A, Kawaguchi J, Yeomans D K, et al. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa. *Science*, 2006, 312: 1330–1334
- 75 Zhang Y, Li J. A survey of granular dynamics modeling and simulation methods for rubble-pile asteroids (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2015, 47: 1–7 [张韵, 李俊峰. 碎石堆小行星的散体动力学建模与仿真方法综述. *力学学报*, 2015, 47: 1–7]
- 76 Andreotti B, Forterre Y, Pouliquen O. Granular media: Between fluid and solid. Cambridge: Cambridge University, 2013
- 77 Jop P, Forterre Y, Pouliquen O. A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, 2006, 441: 727–730
- 78 Kamrin K. Nonlinear elasto-plastic model for dense granular flow. *Int J Plast*, 2010, 26: 167–188
- 79 Sun Q, Jin F, Wang G, et al. On granular elasticity. *Sci Rep*, 2015, 5: 9652
- 80 Claudin P, Bouchaud J P. Static avalanches and giant stress fluctuations in silos. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 231–234
- 81 Pöschel T, Herrmann H J. Size segregation and convection. *Europhys Lett*, 1995, 29: 123–128
- 82 Hill K M, Tan D S. Segregation in dense sheared flows: Gravity, temperature gradients, and stress partitioning. *J Fluid Mech*, 2014, 756: 54–88
- 83 Rosato A, Strandburg K J, Prinz F, et al. Why the Brazil nuts are on top: Size segregation of particulate matter by shaking. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 1038–1040
- 84 Knight J B, Jaeger H M, Nagel S R. Vibration-induced size separation in granular media: The convection connection. *Phys Rev Lett*, 1993, 70: 3728–3731
- 85 Iverson R M. Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback. *J Geophys Res*, 2005, 110: F02015
- 86 Michel P, Richardson D C. Collision and gravitational reaccumulation: Possible formation mechanism of the asteroid Itokawa. *Astron Astrophys*, 2013, 554: L1
- 87 Leinhardt Z M, Richardson D C, Quinn T. Direct N-body simulations of rubble pile collisions. *Icarus*, 2000, 146: 133–151
- 88 Szabo G, Kiss L. The shape distribution of asteroid families: Evidence for evolution driven by small impacts. *Icarus*, 2008, 196: 135–143, arXiv: 0801.2389
- 89 Holsapple K A. Catastrophic disruptions and cratering of solar system bodies: A review and new results. *Planet Space Sci*, 1994, 42: 1067–1078
- 90 Housen K R, Holsapple K A. Impact cratering on porous asteroids. *Icarus*, 2003, 163: 102–119
- 91 Housen K R, Holsapple K A. Ejecta from impact craters. *Icarus*, 2011, 211: 856–875
- 92 Sierks H, Lamy P, Barbieri C, et al. Images of asteroid 21 Lutetia: A remnant planetesimal from the early solar system. *Science*, 2011, 334: 487–490
- 93 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
- 94 Richardson J E, Melosh H J, Greenberg R J, et al. The global effects of impact-induced seismic activity on fractured asteroid surface morphology. *Icarus*, 2005, 179: 325–349
- 95 Korycansky D G, Asphaug E. Impact evolution of asteroid shapes: 1. Random mass redistribution. *Icarus*, 2003, 163: 374–388

- 96 Murdoch N, Rozitis B, Nordstrom K, et al. Granular convection in microgravity. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 018307, arXiv: [1306.1782](#)
- 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, arXiv: [1407.2748](#)
- 98 Asphaug E, King P, Swift M, et al. Brazil nuts on Eros: Size-sorting of asteroid regolith. In: 32nd Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institution, 2001. 1708
- 99 Miyamoto H, Yano H, Scheeres D J, et al. Regolith migration and sorting on asteroid Itokawa. *Science*, 2007, 316: 1011–1014
- 100 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
- 101 Sharma I, Jenkins J T, Burns J A. Tidal encounters of ellipsoidal granular asteroids with planets. *Icarus*, 2006, 183: 312–330
- 102 Walsh K J, Richardson D C. Binary near-Earth asteroid formation: Rubble pile model of tidal disruptions. *Icarus*, 2006, 180: 201–216
- 103 Fu H, Jedicke R, Durda D D, et al. Identifying near-Earth object families. *Icarus*, 2005, 178: 434–449
- 104 Jacobson S A, Scheeres D J. Long-term stable equilibria for synchronous binary asteroids. *Astrophys J*, 2011, 736: L19, arXiv: [1104.4671](#)
- 105 Delbo M, Libourel G, Wilkerson J, et al. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids. *Nature*, 2014, 508: 233–236
- 106 Statler T S. Extreme sensitivity of the YORP effect to small-scale topography. *Icarus*, 2009, 202: 502–513, arXiv: [0903.1119](#)
- 107 Scheeres D J, Gaskell R W. Effect of density inhomogeneity on YORP: The case of Itokawa. *Icarus*, 2008, 198: 125–129, arXiv: [0805.2168](#)
- 108 Hirabayashi M. Failure modes and conditions of a cohesive, spherical body due to YORP spin-up. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 454: 2249–2257, arXiv: [1508.06913](#)
- 109 Scheeres D J. Landslides and Mass shedding on spinning spheroidal asteroids. *Icarus*, 2015, 247: 1–17
- 110 Richardson D C, Elankumaran P, Sanderson R E. Numerical experiments with rubble piles: Equilibrium shapes and spins. *Icarus*, 2005, 173: 349–361
- 111 Jacobson S A, Marzari F, Rossi A, et al. Matching asteroid population characteristics with a model constructed from the YORP-induced rotational fission hypothesis. *Icarus*, 2016, 277: 381–394, arXiv: [1605.06157](#)
- 112 Chandrasekhar S. Ellipsoidal Figures of Equilibrium. New Haven: Yale University Press, 1969
- 113 Lebovitz N R. The mathematical development of the classical ellipsoids. *Int J Eng Sci*, 1998, 36: 1407–1420
- 114 Fassò F, Lewis D. Stability properties of the riemann ellipsoids. *Arch Rational Mech Anal*, 2001, 158: 259–292
- 115 Holsapple K A, Michel P. Tidal disruptions: A continuum theory for solid bodies. *Icarus*, 2006, 183: 331–348
- 116 Holsapple K A. Spin limits of Solar System bodies: From the small fast-rotators to 2003 EL61. *Icarus*, 2007, 187: 500–509
- 117 Davidsson B J R. Tidal splitting and rotational breakup of solid biaxial ellipsoids. *Icarus*, 2001, 149: 375–383
- 118 Holsapple K A. Equilibrium configurations of solid cohesionless bodies. *Icarus*, 2001, 154: 432–448
- 119 Holsapple K A. Equilibrium figures of spinning bodies with self-gravity. *Icarus*, 2004, 172: 272–303
- 120 Sharma I, Jenkins J T, Burns J A. Dynamical passage to approximate equilibrium shapes for spinning, gravitating rubble asteroids. *Icarus*, 2009, 200: 304–322
- 121 Sharma I. Structural stability of rubble-pile asteroids. *Icarus*, 2013, 223: 367–382
- 122 Goldreich P, Sari R. Tidal evolution of rubble piles. *Astrophys J*, 2009, 691: 54–60, arXiv: [0712.0446](#)
- 123 Holsapple K A, Michel P. Tidal disruptions: II. A continuum theory for solid bodies with strength, with applications to the Solar System. *Icarus*, 2008, 193: 283–301
- 124 Hirabayashi M. Structural failure of two-density-layer cohesionless biaxial ellipsoids. *Icarus*, 2014, 236: 178–180, arXiv: [1402.5899](#)
- 125 Hirabayashi M, Sánchez D P, Scheeres D J. Internal structure of asteroids having surface shedding due to rotational instability. *Astrophys J*, 2015, 808: 63–74, arXiv: [1506.03354](#)
- 126 Cates M E, Wittmer J P, Bouchaud J P, et al. Jamming, force chains, and fragile matter. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 1841–1844
- 127 Zhao Z, Liu C, Brogliato B. Energy dissipation and dispersion effects in granular media. *Phys Rev E*, 2008, 78: 031307
- 128 Métayer J F, Suntrup D J, Radin C, et al. Shearing of frictional sphere packings. *Europhys Lett*, 2011, 93
- 129 Clark A H, Kondic L, Behringer R P. Particle scale dynamics in granular impact. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 238302, arXiv: [1208.5724](#)
- 130 Hofmeister P G, Blum J, Heisselmann D. The flow of granular matter under reduced-gravity conditions. In: Nakagawa M, Luding S, eds. AIP Conference Proceedings. Melville NY: AIP Publishing, 2009. 71–74
- 131 Beitz E, Gütler C, Blum J, et al. Low-velocity collisions of centimeter-sized dust aggregates. *Astrophys J*, 2011, 736: 34

- 132 Murdoch N, Rozitis B, Green S F, et al. Granular shear flow in varying gravitational environments. *Granular Matter*, 2013, 15: 129–137, arXiv: [1306.1798](#)
- 133 Murdoch N, Rozitis B, Green S F, et al. Simulating regoliths in microgravity. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 433: 506–514, arXiv: [1306.1764](#)
- 134 Krause M, Blum J. Growth and form of planetary seedlings: Results from a sounding rocket microgravity aggregation experiment. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 021103
- 135 Colwell J E. Low velocity impacts into dust: Results from the COLLIDE-2 microgravity experiment. *Icarus*, 2003, 164: 188–196
- 136 Altshuler E, Torres H, González-Pita A, et al. Extraterrestrial sink dynamics in granular matter. arXiv: [1305.6796](#)
- 137 Housen K R, Schmidt R M, Holsapple K A. Laboratory simulations of large scale fragmentation events. *Icarus*, 1991, 94: 180–190
- 138 Hoerth T, Schaefer F, Thoma K, et al. Hypervelocity impacts on dry and wet sandstone: Observations of ejecta dynamics and crater growth. *Meteorit Planet Sci*, 2013, 48: 23–32
- 139 Housen K, Holsapple K. Momentum transfer during impacts into rocky rubble-pile asteroids. In: Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2014. 2528
- 140 Flynn G J, Durda D D, Patmore E B, et al. Hypervelocity cratering and disruption of porous pumice targets: Implications for crater production, catastrophic disruption, and momentum transfer on porous asteroids. *Planet Space Sci*, 2015, 107: 64–76
- 141 Ghosh A, McSween H Y, Baker A J. A first attempt at thermal modeling of asteroids using the finite element method. *Meteoritics*, 1995, 30: 509–510
- 142 Hirabayashi M, Scheeres D J. Analysis of asteroid (216) Kleopatra using dynamical and structural constraints. *Astrophys J*, 2013, 780: 160, arXiv: [1312.4976](#)
- 143 Hirabayashi M, Scheeres D J. Stress and failure analysis of rapidly rotating asteroid (29075) 1950 DA. *Astrophys J Lett*, 2015, 798: L8
- 144 McGlaun J M, Thompson S L, Elrick M G. CTH: A three-dimensional shock wave physics code. *Int J Impact Eng*, 1990, 10: 351–360
- 145 Boslough M B E, Crawford D A. Low-altitude airbursts and the impact threat. *Int J Impact Eng*, 2008, 35: 1441–1448
- 146 Leinhardt Z M, Stewart S T. Full numerical simulations of catastrophic small body collisions. *Icarus*, 2009, 199: 542–559, arXiv: [0811.0175](#)
- 147 Walker J D, Chocron S, Durda D D, et al. Momentum enhancement from aluminum striking granite and the scale size effect. *Int J Impact Eng*, 2013, 56: 12–18
- 148 Springel V, Hernquist L. Cosmological smoothed particle hydrodynamics simulations: The entropy equation. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 333: 649–664
- 149 Asphaug E, Ostro S J, Hudson R S, et al. Disruption of kilometre-sized asteroids by energetic collisions. *Nature*, 1998, 393: 437–440
- 150 Jutzi M, Michel P. Hypervelocity impacts on asteroids and momentum transfer I. Numerical simulations using porous targets. *Icarus*, 2014, 229: 247–253
- 151 Deller J F, Lowry S C, Snodgrass C, et al. A new approach to modelling impacts on rubble pile asteroid simulants. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 455: 3752–3762
- 152 Syal M B, Owen J M, Miller P L. Deflection by kinetic impact: Sensitivity to asteroid properties. *Icarus*, 2016, 269: 50–61
- 153 Zhang Y, Liu Y, Li J, et al. Effects of impact deflection on hazardous asteroids: The role of asteroid interior structure. In: 4th IAA Planetary Defense Conference. Frascati: International Academy of Astronautics, 2015
- 154 Cleary P W. Large scale industrial dem modelling. *Eng Comput*, 2004, 21: 169–204
- 155 Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 1979, 29: 47–65
- 156 Hong D C, McLennan J A. Molecular dynamics simulations of hard sphere granular particles. *Physica A-Statistical Mech its Appl*, 1992, 187: 159–171
- 157 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
- 158 Richardson D C, Bottke Jr. W F, Love S G. Tidal distortion and disruption of earth-crossing asteroids. *Icarus*, 1998, 134: 47–76
- 159 Walsh K J, Richardson D C, Michel P. Rotational breakup as the origin of small binary asteroids. *Nature*, 2008, 454: 188–191
- 160 Sánchez D P, Scheeres D J. Dem simulation of rotation-induced reshaping and disruption of rubble-pile asteroids. *Icarus*, 2012, 218: 876–894
- 161 Ballouz R L, Richardson D C, Michel P, et al. Rotation-dependent catastrophic disruption of gravitational aggregates. *Astrophys J*, 2014, 789: 158, arXiv: [1406.5228](#)
- 162 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, arXiv: [1408.1979](https://arxiv.org/abs/1408.1979)
- 163 Perera V, Jackson A P, Asphaug E, et al. The spherical Brazil nut effect and its significance to asteroids. *Icarus*, 2016, 278: 194–203, arXiv: [1608.05191](https://arxiv.org/abs/1608.05191)
- 164 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
- 165 Zhang Y, Richardson D C, Barnouin O, et al. Creep stability of the proposed AIDA mission target 65803 Didymos: I. Discrete cohesionless granular physics model. *Icarus*, 2017, 294: 98–123
- 166 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
- 167 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
- 168 Schwartz S R, Michel P, Jutzi M, et al. Catastrophic disruptions as the origin of bilobate comets. *Nat Astron*, 2018, 2: 379–382

Physical properties and structural evolution of asteroids

ZHANG Yun & LI JunFeng^{*}

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

Asteroids are thought to harbor an abundance of valuable mineral resources, and the original materials that were present in the early solar system. The information contained in these small bodies could provide us with critical clues about how the planets formed as well as life started on the Earth. With the help of observations and the data returned by several successful asteroid missions, the progression of asteroid research has been expanded from understanding the asteroids' orbits, shapes, rotation states and spectral classes to exploring more details about their internal structures and how they evolve in response to external effects. Among all the possible forms of asteroids' structures, the rubble-pile structure provides an interesting insight about how asteroids' structures evolve and a reasonable explanation for some observations. However, the discrete and low-strength characteristics of this structure raise many open questions to understanding its evolution, identifying its physical properties, and designing future asteroid missions. Based on the orbital distribution and the observed physical properties of asteroids, this study attempts to draw a whole picture on how asteroids' structure evolves and demonstrates the reasons why most asteroids above 300 m size scale should possess rubble-pile structures. From the perspective of the physics of granular mechanics, a review of progress in investigating the structural characteristics and the dynamical evolution mechanisms of rubble-pile asteroids is present. A thorough comparative analysis on the efforts made by different methods shows that, theoretical analyses and laboratory experiments suffer from the limitation of applications and high economic cost, respectively, while numerical modeling techniques can efficiently serve many purposes. Among all the numerical methods, the discrete element method can retain the discrete nature of rubble-pile structures and can be used to analyze both static and dynamic processes. Some basic problems and potential research interests related to the application of discrete element method on rubble-pile asteroids are suggested.

asteroids, structural evolution, rubble-pile structure, discrete element method

PACS: 96.30.Ys, 61.43.Bn, 45.70.-n

doi: [10.1360/SSPMA2018-00352](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00352)