动能撞击防御小行星的前沿科学问题

李明涛[1,3]，王楷铎[2]，周 琪[2,3]，王 赤[2,3]

（1. 国家航天局 小行星监测预警研究中心，北京 100101；2. 中国科学院 国家空间科学中心，北京 100190；
3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：动能撞击被认为是最具工程可行性的小行星防御手段。实施在轨演示验证任务，不仅能够提升动能撞击技术的成熟度，还能够揭示近地小行星的轨道偏转规律，从而为未来应对真实场景下的近地小行星撞击威胁提供决策参考。近地小行星的轨道动力学特征及其结构物理化学特性，对动能撞击任务成功实施至关重要。同时，动能撞击任务也将为认识近地小行星的内部结构、组分及力学性能提供前所未有的机会。此外，动能撞击还将成为一个独特的“天然实验”，为比较行星学视角下的撞击物理研究提供关键案例，从而推动行星科学和行星防御技术的共同发展。本文面向中国计划在2030年前实施的首次小行星防御演示验证任务，系统梳理了动能撞击防御小行星的前沿科学问题，旨在为任务的设计实施及先期科学研究提供参考。

关键词：小行星；小行星防御；动能撞击；关键科学问题

中图分类号：V11 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9287(2026)03-0209-16

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20260048

引用格式：李明涛，王楷铎，周琪，等. 动能撞击防御小行星的前沿科学问题[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（3）：209-224.

Reference format: LI M T，WANG K D，ZHOU Q，et al. Frontier scientific issues in kinetic impact asteroid defense[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（3）：209-224.

引 言

近地小行星撞击地球是人类社会面临的共同威胁和长期挑战。6 600万年前，一颗等效直径超过10 km的近地小行星撞击北美墨西哥湾尤卡坦半岛，这被认为是导致恐龙灭绝的重要原因之一[1]。1908年6月30日，一颗等效直径约60 m的小天体撞击了俄罗斯通古斯河地区，焚毁了超过2 000 km^{2}的原始森林[2-3]。2013年2月15日，一颗等效直径约为18 m的小行星在俄罗斯车里雅宾斯克地区上空解体空爆，导致约1 500人受伤、3 000余栋房屋受损[4]。2025年初，联合国国际小行星预警网络（International Asteroid Warning Network，IAWN）发出警报，称等效直径约65 m的2024 YR4小行星可能在2032年撞击地球，概率一度高达3.1%，尽管目前该小行星撞击地球的概率已降为零，但它仍有约4.3%的概率撞击月球[5-6]。

行星防御是人类为应对近地小行星等天体撞击地球威胁而构建的技术体系，包括监测预警、在轨处置、灾害救援、国际合作等环节。目前，对地球构成撞击威胁的地外天体主要是近地小行星和彗星，其中近地小行星占绝大多数，因此行星防御也被称为小行星防御。开展小行星防御是续存人类文明、保卫人民生命财产的必然要求，也是构建人类命运共同体的重要体现，更是牵引空间科学、空间技术和空间应用全面发展的重要抓手[7-9]。1994年的彗木相撞事件引发了全球对行星防御的关注，1995年在联合国召开了首次全球行星防御研讨会，车里雅宾斯克事件直接推动了联合国在2014年成立了国际小行星预警网络和空间任务规划咨询组（Space Missions Planning Advisory Group，SMPAG）。2016年，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）成立行星防御协调办公室（Planetary Defense Coordination Office，PDCO），2018年欧洲成立了欧洲空间局行星防御办公室（Planetary Defence Office，PDO）。2021年，中国国家航天局宣布将建设近地小行星防御系统[10-13]。上述进展表明，行星防御已不再局限于撞击风险认知和科学讨论，而是逐步发展为涵盖监测预警、工程验证、战略部署和国际协同的全球公共安全议题。

科学界迄今已提出了核爆、动能撞击、引力牵引、离子束偏移、激光烧蚀等多种在轨处置技术手段，其中绝大多数仍处于预先研究阶段。动能撞击技术通过航天器高速撞击小行星，改变小行星的瞬时速

收稿日期：2026-06-10 修回日期：2026-06-23

度并最终实现有效偏转小行星轨道的目标[14-17]。目前，动能撞击被公认为是最接近工程可行的在轨处置技术手段，但仍面临真实尺度撞击地面等效验证难、超高速撞击导航制导控制难、小行星目标特性测量与认知难、轨道偏转效果预测评估难等挑战[15,19]。因此，需要通过实施在轨试验任务来提高动能撞击防御小行星的可行性、探明小行星的轨道偏转规律，为未来真实场景下应对近地小行星撞击威胁提供决策参考[18-20]。

2022年，美国实施了“双小行星重定向测试（DART）”任务，首次在太空中验证了动能撞击防御小行星的技术，并且显著改变了双小行星系统的相互绕转轨道[18,21-22]。然而，该试验并没有直接改变小行星相对太阳及地球的轨道，与真实行星防御场景不符；其目标小行星为等效直径约160 m碎石堆结构，而几十米级小尺寸近地小行星更可能表现为单体岩石或高强度结构[23]。因此，未来仍然需要针对中小尺寸小行星开展直接偏转其轨道的在轨试验。中国将在2030年前实施首次小行星防御在轨验证任务，通过动能撞击直接偏转一颗等效直径约30 m的小行星相对太阳和地球的轨道，并通过天地协同监测网络评估撞击效果[19,24]。

小行星是太阳系形成的“化石”记录，封存了太阳起源与早期演化的关键信息，对揭示太阳系演化、地球水与生命起源等根本问题具有不可替代价值[25-26]。中国计划于2030年前实施的动能撞击防御任务，不仅为行星防御提供了前所未有的技术验证平台，更带来了一场深刻的科学机遇：不仅能深化对小行星轨道、形貌、物质组成等表面特征的理解，更能原位探测反演小行星内部结构、组分、强度等隐性特征，并开创性研究动能撞击下的动量传递机制与轨道偏转规律。动能撞击还将成为一个独特的“天然实验”，为比较行星学视角下的撞击物理研究提供关键案例，推动行星科学和行星防御技术的共同发展。

本文以中国计划于2030年前实施的动能撞击防御小行星任务为背景，系统梳理动能撞击防御小行星的核心科学问题，包括目标小行星轨道特征及动力学演化规律、目标小行星多尺度物理化学特征的高精度表征、小行星内部结构组分及力学性能的原位探测反演、动能撞击下的动量传递机制与轨道偏转规律、比较行星学视角下的撞击物理研究，为开展动能撞击防御小行星任务先期科学研究提供参考。

1 动能撞击防御小行星任务分析

航天器通常以数千米每秒的相对速度超高速撞击小行星。在此撞击作用下，航天器动能会以冲击波形式转化为小行星的动能和热能；在冲击波驱动下，小行星物质发生塑性形变、物相转变、结构断裂等过程，进一步驱动物质挖掘和局部位移，产生成坑和物质溅射宏观响应，最终在小行星表面形成撞击坑，极端情况下还会导致小行星局部破碎甚至完全解体。

在航天器直接动量传递以及溅射物反冲效应的共同作用下，近地小行星的动量将发生改变，进而使其速度产生瞬间增量；随着时间的推移，近地小行星轨道将发生显著偏转，最终改变小行星相对于地球的距离。

在轨演示验证任务通过观测获取超高速撞击作用下，小行星的全链路动态响应过程及轨道偏转演化特征，实现试验效果的科学评估，进而揭示超高速撞击近地小行星的动量传递与轨道偏转规律，为未来真实近地小行星撞击威胁应对场景下的任务设计提供科学依据。

中国首次小行星防御演示验证任务的设计原则包括“撞得准——精准撞击小行星”“推得动——有效偏转小行星轨道”“测得出——精确测量试验效果”“说得清——撞击后对地球无风险”。

演示验证任务探测器系统由撞击器和观测器组成。撞击器主要任务是实现对目标近地小行星的精准撞击，撞击速度>9 km/s；观测器的主要任务是在撞击前、中、后对目标小行星及撞击过程实施观测，获取撞击过程动态响应数据，与地基系统联合评估试验效果。任务轨道示意如图1所示，任务总体方案设想如图2所示。

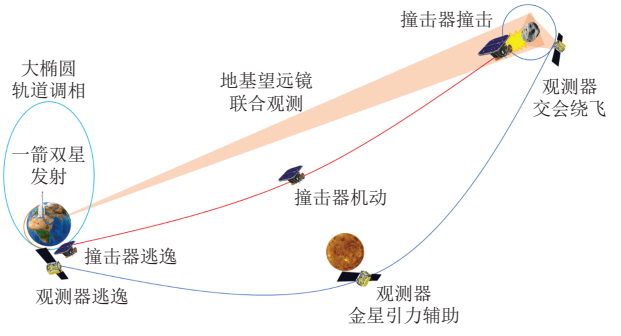


图 1 任务轨道示意图[11]

Fig. 1 Mission trajectory diagram[11]

目前已经初步选定2015XF261小行星为首次小行星防御在轨演示验证任务的目标小行星，它是一颗阿登型近地小行星，轨道半长轴为0.989 836 7 AU，绝对星等为25.25，等效直径为21.6 （反照率0.3）~74.9 m（反照率0.025）。按平均反照率0.15计算，其等效直

径约为30.6 m。该小行星2015年被发现，迄今积累了74条光学观测数据，但其自转、光谱类型等信息尚不详。该小行星在2029年和2030年将进入到距离地球约700万km范围内，为实施撞击试验和效果观测评估提供了良好时机[19]。

与美国DART任务相比，中国首次小行星防御演示验证任务存在以下特点：①目标小行星为等效直径约30 m的单体小行星；②任务目标是直接改变目标小行星相对太阳和地球的轨道，或者破坏其结构；③撞击速度超过9 km/s；④通过抵近观测实时监视撞击过程动态响应；⑤通过地基和天基监测设备实现对撞击单体小行星试验效果的综合评估[19]。

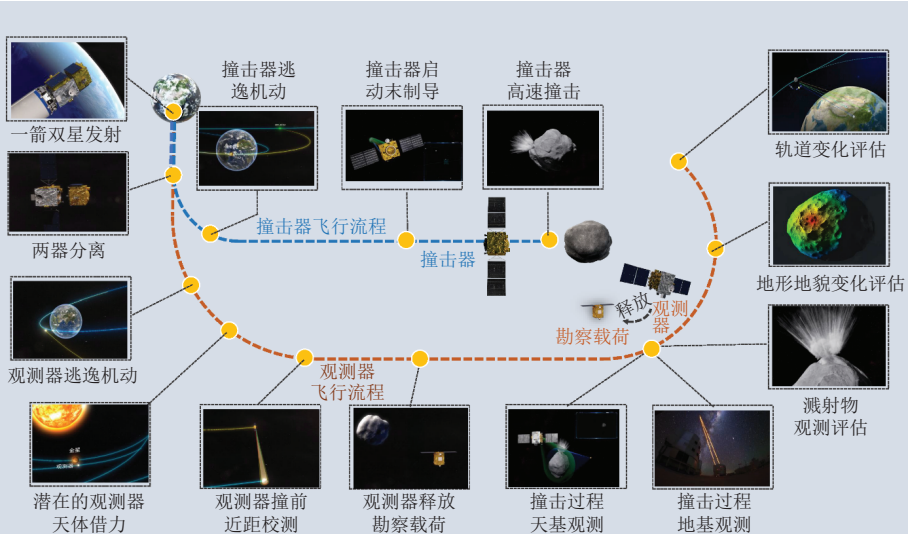


图 2　小行星动能撞击在轨处置验证任务总体方案设想[19]

Fig. 2　Conceptual design for the on-orbit test mission of kinetic impact asteroid defense[19]

2　动能撞击防御小行星的科学问题

2.1　目标小行星轨道特征及动力学演化规律

要实现动能撞击任务的四大核心目标，目标小行星的轨道特征与动力学演化规律至关重要：它是“撞得准”的先决条件，为航天器提供精准导航路径；是“推得动”的直观体现，直接反映撞击对小行星轨道的偏转效果；是“测得出”的核心证据，为轨道偏移量的观测提供数据基础；更是“说得清”的关键参考，助力科学家解析撞击背后的动力学原理[19-20]。

2.1.1　30 m级目标小行星的轨道特征精确测定

撞击前对目标小行星的观测与定轨将为验证任务提供轨道动力学特征。近地小行星在太阳系运行，受到复杂的太阳系天体引力、非引力扰动以及相对论效应等因素影响。太阳光压、Yarkovsky效应[29]等非引力效应极其微弱，难以精确测定，但对目标小行星长期轨道演化至关重要。从观测的角度，30 m级近地小行星的亮度过于暗弱，大部分时间亮度暗于24 mag，因此现有的光学观测数据呈现出极度稀疏的特征，仅离散地分布在有限的观测弧段内，且不同观测站的数据质量存在差异。尽管在撞击之前，目标小行星会逐渐变亮，但大部分时间视星等仍然暗于22 mag甚至23 mag，能够对其进行观测的望远镜极其有限，且大口径光学望远镜观测时间较为昂贵。直到撞击前约3个月，观测器才能对目标小行星开展抵近观测。在撞击前数日，地基雷达才可能观测到目标小行星。因此，精确测定30 m级目标小行星的精密轨道特征非常具有挑战性，需要解决多历元多站稀疏光学观测数据的质量评估与赋权、有限观测资源条件下极暗弱目标小行星增量式观测优化、光学/雷达/测控数据融合精密定轨模型、以及融合抵近观测数据小尺寸小行星极微弱非引力效应探测与反演等难题[27]。

2.1.2　动能撞击导致微弱速度改变量的精确评估

撞击瞬间，目标小行星速度会产生cm/s～dm/s量级变化。撞击后，地基光学和雷达观测数据存在有限的观测弧段，但由于溅射尘埃等影响，光学及雷达观测数据对目标小行星的轨道测量质量会有所下降。直至1年后，目标小行星再次回到近地点附近时，地基光学和雷达才能对其进行观测。因此，尽管目标小行星在撞击前存在较长的观测弧段，但由于目标小行星轨道在撞击瞬时发生了改变，在撞击后目标小行星轨道观测弧段仅有1年，并且分布极为稀疏。需要解决的科

学问题包括：①如何刻画撞击速度改变对轨道不确定性分布演化影响；②如何融合撞击前后光学/雷达/抵近观测数据确定撞击后目标小行星的精确轨道；③如何精确评估撞击对目标小行星的轨道改变量；④如何确定评估轨道改变量所需最短时间。

2.1.3 目标小行星长期轨道动力学演化规律

撞击后目标小行星的长期轨道演化是回答“说得清”的核心。其长期轨道演化预测的精度取决于目标小行星的测量精度以及动力学演化模型的准确性。对目标小行星在撞击后开展长期跟踪观测，融合光学、雷达、抵近观测数据等多源观测数据，不仅能够确定目标小行星的精确轨道，也能够为标定目标小行星的轨道动力学演化模型提供机会，揭示影响近地小行星轨道长期演化的摄动因素及其作用量级，为未来开展近地小行星轨道演化分析、轨道交会计算、撞击风险评估等提供参考。

2.2 目标小行星多尺度物理化学特征的高精度表征

观测器将携带成像/光谱/微波/粒子/尘埃等多种科学载荷，对目标小行星开展多维度抵近探测，获取目标小行星的高精度原位探测数据，为高精度表征目标小行星的动力学、表观形貌、结构材料和动态环境等物理化学特征提供机会[28]。同时，通过对比抵近探测数据和撞击前的地基光变和光谱等远程观测数据，并结合实验室内陨石化学分析，探索建立“地基远程观测–原位精准探测”的联系，明确不同观测手段下物理化学特征的表征映射关系，为未来综合研判小行星物理化学特征提供参考。

2.2.1 目标小行星动力学特征

小行星的动力学特征是其在太阳系形成与演化过程中形成的核心属性，包括自转特征（自转速度及自转轴指向）、YORP效应特征（非对称光热辐射导致自转速度、自转轴变化和自转稳定性）、Yarkovsky效应特征（太阳光热辐射产生非引力推力导致小行星轨道缓慢漂移）、活动性特征（喷发粒子及尘埃释放行为）等[29-30]。

从动力学耦合机制来看，小行星的动力学特征与轨道特征存在紧密的相互调控关系：一方面，Yarkovsky效应作为核心非引力因素直接驱动轨道演化，而自转轴指向（受YORP效应调控）又会影响Yarkovsky效应的作用强度与方向，形成“自转–热物理–非引力效应–轨道”的耦合链[31]；另一方面，轨道参数（如日心距离、轨道偏心率）决定了小行星接收的太阳辐射通量，进而反向调控YORP、Yarkovsky效应的作用效率，影响动力学特征的演化速率。同时，动力学特征与表观形貌、结构材料特征存在内在关系：不规则形状的表观形貌是YORP、Yarkovsky效应产生的前提，而小行星的结构致密程度、表面热惯性（由材料属性决定）直接影响光热辐射的能量传递效率，进而量化动力学效应的强度；反之，长期的自转演化可能引发小行星表面物质剥离与更新[32]、形态重塑[33]、赤道脊形成[33-34]、双小行星形成[35]，动力学特征的变化可间接反演其内部结构、材料属性和演化历史。

小行星的动力学特征是太阳系运行历史的“天然记录器”：自转速率的演化轨迹、自转轴的指向变化、轨道的漂移历程、非引力效应、活动性变化等，均蕴含了其形成初期的原始状态信息，以及后续与其它小天体的碰撞作用、长期太阳辐射作用等演化线索。因此，深入解析动力学特征，是揭示目标小行星动力学起源与太阳系演化关联的关键突破口。通过融合望远镜远程观测数据与观测器抵近探测数据，可实现“宏观轨道–微观形貌–核心动力学”的全链条数据互补，不仅能提升目标小行星动力学特征刻画的精确性，更能系统理清动力学特征与轨道特征、形貌特征、结构材料特征的耦合机制及定量约束关系，为完整还原目标小行星的动力学起源与演化历史提供不可或缺的科学支撑。作为小行星动力学特征的重要组成，小行星活动性特征是其表面及次表层物质动态响应外界环境与内部状态变化的直观体现，核心表现为表面物质迁移[30]、粒子喷发[32]、尘埃释放[36]、气体或挥发性组分逸出及碎片抛射[37]等非稳态行为，部分活跃小行星还可能形成短暂的尘埃尾或碎片流[38]。

小行星活动性特征的触发机制具有显著的多元耦合特性：从外部驱动来看，轨道运行至近日点附近时太阳辐射通量和表面温度剧增，可能诱发表面水冰或其它挥发性组分升华、含水矿物脱水、岩石热裂解或热应力破坏[39-41]，从而导致尘埃和颗粒抛射；小行星与流星体的随机碰撞则会直接冲击和扰动表面物质，诱发瞬时活动性，引发瞬时抛射或局部表面更新[42-43]。从内部调控来看，YORP效应驱动的长期自转加速可能使表面物质所受离心力超过自身重力，诱发物质剥离、滑移、质量脱落或旋转裂解[44-45]；而内部结构不均一性（如宏观孔隙率差异、颗粒尺寸分布、石块堆积状态）[45]与材料强度特性[32]，则会共同影响活动性发生的阈值、规模与持续时间。此外，活动性特征还与小行星的演化历史紧密相关[47-49]，早期碰撞破碎与引力重聚积形成的疏松表层物质、岩石热裂解产生的碎裂物质以及母体形成过程中捕获的挥发性组分，均为活动性的发生提供了物质基础。

2.2.2　目标小行星表观形貌特征

小行星的表观形貌特征是其物理属性的直观外在体现，是解析小行星起源与演化的重要切入点，涵盖三大核心维度：几何特征、三维形貌特征与辐射特征，各维度既相互关联又各具独特的科学价值。小行星的表观形貌特征对动能撞击任务的成败与科学目标的实现具有不可替代的关键作用，直接贯穿“撞得准、推得动、测得出、说得清”四大核心目标。

其核心作用体现在三方面：一是保障撞击精度，小行星的不规则形状、表面地形起伏、自转状态会影响撞击器的导航制导控制，需基于高精度形状模型和表面形貌数据确定最优撞击点；二是决定动量传递效率，撞击瞬间的动量传递因子（即小行星获得的实际动量与撞击器初始动量的比值）不仅受撞击速度和撞击角度控制，还与表层材料强度、宏观孔隙率与微观孔隙率、内摩擦角、表层岩石分布、表面地形坡度、表面粗糙度等密切相关[21,50-55]，进而影响轨道偏转效果；三是支撑撞击效果观测，撞击前的形状、表面地形、撞击坑分布、表面石块分布和表面粗糙度等基线数据，是识别撞击后表面形变、撞击坑形成、物质抛射范围、表面岩石位置变化以及整体形貌变化的重要参照[50,56-63]，是量化撞击影响的核心基准。建立形貌特征与撞击效果的量化关联，是提升动能撞击任务效能、验证小行星轨道偏转技术的核心前提，也为未来近地小行星防御任务的方案设计提供关键支撑。

几何特征聚焦小行星的宏观形态参数，具体包括尺寸（长轴、中轴、短轴、等效直径、轴比）、形状（不规则外形、球度）与体积。精准的几何参数是建立小行星高精度三维形状模型、评估小行星质心位置（结合小行星引力场评估）、量化小行星质量（结合密度估算）、估算表面地形坡度、角动量等关键动力学参数的基础，也可用于判断小行星是否具有碎石堆结构、接触双星形态[34,64-68]、赤道脊（陀螺型小行星结构特征）[48]、双叶形态[69]，也是判断小行星是否经历过碰撞破碎、引力重聚积、自转失稳或潮汐撕裂的重要依据[33,70]。几何特征相关的科学问题包括：①如何利用抵近光学成像与激光测距数据融合方法，实现小尺寸小行星高精度几何参数测定；②不规则几何形态（包括接触双星形态、赤道脊、双叶形态等）与小行星自转状态、轨道演化的内在关联机制是什么；③小尺寸小行星的形状分布特征及其成因；④体积估算误差对小行星质量影响量化分析等。

形貌特征聚焦小行星表面的微观地形细节，主要包括地形起伏（如山峰、洼地、脊线、表面坡度）、表面岩石（尺寸、空间分布、丰度、形态、表面粗糙度）及撞击坑（尺寸、深度、形态、退化程度、二次坑、密度、空间分布）[71]。表面形貌特征记录了小行星的地质活动历史，可反演其遭受撞击的频率、强度及演化年代、表面暴露年龄、风化层形成过程、颗粒迁移路径等[43,72-73]，也可对其结构强度进行约束[50,62]，此外也会影响小行星的YORP效应和自转演化[74-75]；表层岩石分布特征则能反映小行星母体撞击破碎之后引力重聚积、内部结构的不均一性与表层物质的运动规律[33,70]，并可能影响动能撞击过程中的溅射物产生、撞击坑形成和动量传递效率。

形貌特征相关的科学问题包括：①基于高精度形貌特征的最优撞击点筛选准则与量化评估方法；②不同形貌参数（形状不规则度、表面坡度、表面粗糙度、石块丰度、表层岩石分布特征）对动量传递因子的影响规律；③撞击后表面形貌变化、物质抛射范围、岩石位置迁移与撞击能量、小行星物质属性、内部结构的关联模型；④如何利用抵近观测的形貌基线数据与撞击后观测数据，精准反演撞击产生的动量传递效率和小行星材料力学特征；⑤基于抵近观测的小行星表面撞击坑年代学分析方法构建；⑥表面大型岩石的暴露年龄分布、空间分布与成因机制及其对撞击动量传递的影响；⑦地形起伏对小行星表面物质运动（如颗粒流、尘埃迁移）的调控作用；⑧撞击坑分布特征与小行星自转演化、表面重塑和结构强度的耦合关系。

辐射特征主要包括反照率（整体反照率、局部反照率差异）与光谱特征（反射光谱、吸收特征峰位置与强度），是揭示小行星物质成分的核心依据。反照率可直接关联小行星的物质类型（如碳质、硅质、金属质）与表面风化程度[76-77]；光谱特征中的吸收峰可精准识别表面矿物组分（如橄榄石、辉石、水合矿物）、有机质与挥发性物质（如冰质组分），为追溯小行星的母体性质、形成区域与物质来源提供关键线索[77-79]。辐射特征相关科学问题包括：①小行星局部反照率差异与表面物质成分、地形类型、石块分布、风化程度和撞击改造的关联机制；②近地小尺寸小行星光谱特征及其成因；③反照率与热惯性的耦合关系及其对Yarkovsky效应的调控作用；④基于远程光谱与抵近观测光谱融合的小行星物质成分高精度反演模型构建。

2.2.3　目标小行星结构材料特征

小行星的结构材料特征是揭示其形成机制、演化历程的核心内核，也是决定动能撞击任务动量传递效率与轨道偏转效果的关键因素，直接关联“推得动、说得清”核心目标的实现。其核心涵盖四大维度：物质成

分、结构组成、力学特征与热物理特征，各维度相互制约、协同决定小行星的宏观物理化学属性与动力学响应规律。

物质成分是小行星结构材料特征的基础，具体包括元素组成、同位素组成、矿物组成与挥发性组分。物质成分为追溯小行星形成区域（如内太阳系、外太阳系）[80]、物质来源（如原始太阳星云不同区域物质凝聚产物、行星胚胎碎片、某次撞击解体的产物）[81-82]与演化路径（受巨行星迁移、共振扰动或小行星撞击等动力学过程影响进入近地空间）[83]提供关键约束，也是划分小行星光谱类型[77]、推断其母体与族群性质的重要依据[84-87]。不同元素丰度、矿物组合、水合矿物、有机质及挥发性组分的差异，可反映小行星形成时太阳星云中的温度条件、内外太阳系物质分异、母体水蚀变与热变质程度，以及后期撞击破碎解体、引力重聚积和轨道迁移过程[26,88-95]。物质成分相关的科学问题包括：①如何通过远程光谱与抵近探测光谱融合，实现小行星物质成分的高精度反演；②小行星表面物质成分与内部物质成分的差异机制及其成因（如空间风化、冲击变质、热变质和水蚀变等成因）；③挥发性组分在小行星内部的赋存状态与分布规律；④不同类型小行星物质成分的演化差异及其与太阳系早期演化的关联。

结构组成聚焦小行星的内部与表层结构形态，具体包括内部结构（如宏观孔隙率、微观孔隙率、颗粒尺寸分布、分层结构、密度不均一性、整体构型）[34]与表层结构（如风化层厚度、松散颗粒覆盖度、岩石聚集状态、撞击坑形态、物质迁移痕迹等）[43,71]。结构组成直接反映小行星的形成过程（如母体破碎解体[96]、引力重聚积[47]、熔融分异[97]、自转失稳[35,98]）与后期演化历史（如撞击改造[43]、潮汐扰动[99]、空间风化[100]、表层物质迁移[101-103]），同时决定小行星力学性质、热物理性质和撞击响应[50,104]，及小行星对撞击的耐受性与动量吸收能力。结构组成相关的科学问题包括：①基于抵近探测成像与雷达穿透数据的小行星内部结构反演方法构建；②表层风化层的形成机制（空间风化、微流星体撞击改造、热疲劳、撞击破碎、物质迁移）及其演化规律；③宏观孔隙率、颗粒尺寸分布特征与小行星自转演化、撞击历史的耦合关系；④内部孔隙率、石块分布不均一对小行星密度估算、引力场特征、撞击解体阈值、动量传递效率与轨道动力学特征的影响量化分析。

力学特征是小行星材料在外载荷作用下表现出的形变、损伤与破坏响应属性，主要包括抗压强度、抗拉强度、剪切强度、弹性模量、剪切模量、内聚强度、宏观孔隙率、微观孔隙率及内摩擦角等参数[105-106]。其中，内聚强度是约束小行星在微重力环境下撞击坑形成、物质抛射和动量传递效率的重要参数[62]，内聚强度的精准获取决定冲击动力学仿真结果的可靠性与准确性，但其与抗拉强度、抗压强度、宏观孔隙率、微观孔隙率等可能存在耦合作用[51]，需要综合考虑。同时，抗压强度、抗拉强度、内聚强度、剪切强度等力学参数可能存在尺度效应[107]，进一步增加小行星力学特征评估的不确定性。力学特征是评估动能撞击任务中动量传递效率、撞击后物质抛射特征、小行星结构稳定性及解体阈值的关键依据，也是制定近地小行星防御方案和开展冲击动力学数值仿真的重要基础[108]。由于小行星材料具有弱引力、低围压、非均一性和尺度效应等特点，其力学参数难以通过单一手段直接精确测定，需要综合抵近探测、原位试验、地面低速/高速冲击实验、连续介质数值仿真模拟等方法进行联合约束[109]。力学特征相关科学问题包括：①如何通过抵近探测、原位试验、实验室测试与数值模拟相结合，精准测定小行星表层与次表层材料的力学参数（尤其是内聚强度、抗拉强度、孔隙率、内摩擦角）；②小行星材料力学特征随深度、粒径、孔隙率、岩石分布的变化规律及其成因（如撞击破碎、引力吸积、岩石热裂解、空间风化成因）；③高速撞击载荷作用下小行星材料的拉伸破坏、剪切破坏、孔隙压实与损伤演化机制如何耦合；④如何共同决定破碎解体阈值与物质抛射效率，不同结构组成（如宏观孔隙率、颗粒尺寸分布、表层与次表层石块分布、分层结构）对小行星力学特征的调控作用。

热物理特征反映小行星材料的热能吸收、传递与储存能力，具体包括热导率、热扩散率、热惯性、反照率及比热等参数[100,110-112]。其科学意义在于：热物理特征直接调控太阳光辐射引发的热传导与热辐射过程，是影响Yarkovsky、YORP等非引力效应强度与效率的核心因素，同时关联小行星表面温度分布与热应力演化[113-115]。可研究的科学问题包括：①基于抵近热红外探测数据的小行星热物理参数高精度反演方法；②热物理特征与物质成分、结构组成（如孔隙率、颗粒尺寸、石块分布、表层粗糙度）的内在关联机制；③小行星热物理参数的空间异质性及其对Yarkovsky效应空间分布、YORP效应的影响；④长期太阳辐射作用下小行星热物理特征的演化规律。

2.2.4 目标小行星动态环境特征

小行星的动态环境特征是其与太阳系空间环境相

互作用的直观体现，也是影响抵近探测任务实施、动能撞击效果及小行星自身演化的关键因素。精准表征动态环境特征，不仅能为观测器及其设备防护、撞击器轨道精准规划提供环境参数支撑，还能揭示环境与小行星动力学特征、结构材料特征的耦合演化机制，对完善小行星物理化学属性认知、保障动能撞击任务“撞得准、测得出”核心目标实现具有重要价值。

引力特征指小行星自身引力场分布特征，包括引力场强度空间分布、引力势函数、质心引力参数，以及不规则形状小行星的非球形引力场效应（如引力梯度、局部重力异常）。引力特征是探测器抵近飞行、轨道规划、精准撞击定位的核心约束条件，直接决定探测器的轨道稳定性；同时，引力场分布与小行星内部质量分布（如密度不均、孔隙率、质心位置）直接相关，可通过引力特征反演小行星内部结构[116-117]。引力特征相关科学问题包括：①如何通过抵近探测的轨道动力学数据反演小尺寸不规则小行星的高精度引力场引力梯度对探测器近距离机动的影响规律及规避策略；②小行星引力场特征与内部质量分布、结构组成的定量关联模型；③非球形引力场对小行星卫星（若存在）轨道演化的调控作用。

等离子体特征指小行星周边的等离子体环境状态，包括等离子体密度、温度、速度、能量分布、成分（如太阳风离子、电子），以及太阳风与小行星表面的相互作用过程（如太阳风粒子注入、电荷交换、局部电场变化、等离子体鞘层形成）。等离子体环境会影响探测设备的电磁信号传输（如测控通信干扰），还会通过电荷积累影响小行星表面物质的电学性质与运动状态（如尘埃带电悬浮、表面颗粒迁移）；同时，等离子体相互作用过程记录了太阳风与小行星的能量交换规律，为研究太阳系空间等离子体与小天体的作用机制提供依据[118-119]。等离子体特征相关科学问题包括：①基于抵近原位探测的小行星周边等离子体参数高精度测量方法；②太阳风强度变化对小行星等离子体鞘层结构的影响规律；③等离子体环境与小行星表面物质带电特性的耦合关系；④太阳风直接轰击小行星表面产生的反射/溅射粒子的分布特征及其对小行星表面特性的依赖规律。

磁场特征指小行星可能的自身磁场（固有磁场）与感应磁场的综合特征，包括磁场强度、方向的空间分布、磁场梯度，以及磁场与太阳风、等离子体的相互作用效应。磁场特征是判断小行星起源的关键线索（如固有磁场可反映小行星形成初期是否经历熔融分异）；同时，磁场会影响周边等离子体的运动轨迹，进而调控尘埃粒子的带电与分布，还可能对撞击后溅射物质的运动产生约束[120-121]。磁场特征相关科学问题包括：①如何通过原位磁强计探测区分小行星的固有磁场与感应磁场；②小行星磁场强度与内部金属相含量、母体性质的关联机制；③磁场对周边尘埃环境、等离子体环境的调控作用量化分析；④小尺寸小行星磁场的时空稳定性及其成因。

热环境特征指小行星所处的外部热作用与表面热状态，包括太阳辐射在小行星表面的分布与吸收效率、表面温度的时空分布（如昼夜温差、赤道与极区温差）、热辐射场强度，以及太阳辐射与小行星表面的热交换过程。热环境是驱动小行星表面物质热应力积聚和热裂解、挥发性组分升华的核心外部因素，直接影响小行星活动性（如尘埃喷发、颗粒抛射、气体释放）；同时，热环境参数是修正热物理特征反演结果的关键依据，也会影响探测设备的工作温度与寿命[41,78]。热环境相关科学问题包括：①基于抵近热红外探测的小行星表面温度时空分布高精度反演；②热环境时空变化与小行星自转状态、轨道参数（日心距离、偏心率）的耦合关系；③热环境对小行星表面物质风化、颗粒破碎、热应力裂解、挥发分升华的影响规律；④撞击后热环境变化（如撞击点余热辐射）与撞击能量、物质属性的关联模型。

尘埃环境特征指小行星周边的尘埃粒子分布与运动状态，包括尘埃粒子的尺寸分布、数密度、空间分布范围，以及尘埃粒子的运动速度、带电状态，还涵盖撞击后溅射尘埃的扩散与演化过程。尘埃环境会干扰光学成像、光谱探测等设备的观测精度，甚至可能对探测器表面造成侵蚀和撞击破坏；同时，尘埃粒子的来源（表面风化、撞击溅射、活动性喷发）与运动规律，直接反映小行星表面物质的稳定性与动力学演化过程[32,122]。尘埃环境相关科学问题包括：①抵近探测中尘埃环境的原位探测方法与防护策略；②尘埃粒子的尺寸、速度分布与小行星表面物质属性（如强度、孔隙率、风化程度）的关联机制；③尘埃粒子的力学特性与小行星表面力学特性的关联性；④撞击后溅射尘埃的扩散规律及其对轨道观测的影响；⑤尘埃带电状态与等离子体、磁场环境的相互作用机制。

微流星体环境特征指小行星运行轨道周边的微流星体（微米级至毫米级星际颗粒、尘埃）分布、通量及与小行星的相互作用特征，包括微流星体的撞击频率、撞击速度、撞击能量，以及撞击引发的表面物质交换、改造效应和溅射效应。微流星体撞击是小行星表面风化层形成的重要驱动因素，长期撞击会改变小

行星的表面形貌、结构材料状态与自转状态，也会影响撞击后小行星表面物质的动态演化、小行星周边尘埃环境；同时，微流星体撞击风险是抵近探测设备防护设计的关键考量[46,123]。微流星体环境特征相关科学问题包括：①基于抵近探测的小行星轨道微流星体通量精准测量方法；②微流星体撞击对小行星表面物质的溅射效应与风化层更新机制；③微流星体撞击产生的地震扰动、颗粒抛射、回落过程如何影响小行星表面形貌、结构材料状态和尘埃环境；④不同尺寸微流星体的撞击风险评估与探测设备防护策略；⑤微流星体撞击与小行星活动性特征的耦合关联（如是否触发尘埃喷发）。

2.3 小行星内部结构组分及力学性能的原位探测反演

动能撞击任务的核心科学价值不仅在于实现小行星轨道偏转，更在于通过主动撞击的“强制性挖掘”效应，将小行星表层物质剥离，使次表层甚至深部物质暴露于探测视场，为突破传统抵近探测“仅能观测表层”的局限、精准探测小行星内部结构、物质组分及力学特性提供独特且不可替代的契机，对完善小行星物理化学属性认知、验证内部结构演化模型、修正冲击动力学模型参数、支撑近地小行星防御任务的精准评估具有关键支撑作用。

动能撞击诱发小行星内部物质暴露的核心机制，源于撞击瞬间的动量传递、能量释放和冲击波传播过程。撞击器高速撞击表面后，将动能转化为冲击波和物质运动能量，破坏撞击点周边表层物质的结构完整性，引发表层破碎、溅射与剥离[21]；同时，冲击压缩和随后的挖掘流会形成撞击坑和喷射帘幕，将原本位于次表层至内部的物质带至表面或近表面观测区域[61-62]；受小行星引力影响，在撞击坑形成与扩展过程中，坑壁物质会坍塌、坑底物质可能反溅，部分抛射物质可能会回落形成二次坑[37,124]。内部物质的暴露程度与挖掘深度，主要取决于撞击能量、撞击角度、撞击点地形、小行星表层及内部的力学特性（如内聚强度、抗压强度、抗拉强度、宏观与微观孔隙率）[50,125]与结构组成（如颗粒尺寸分布、石块丰度、分层结构）[33,126-127]，形成“撞击参数–物质属性–暴露深度”的耦合关联。

动能撞击诱发的内部物质暴露、撞击坑形成、溅射物回落沉积，为精准探测小行星内部结构特征提供了直接途径。小行星内部结构（如分层结构、风化层厚度、宏观与微观孔隙率分布、颗粒尺寸分布、石块丰度、密度非均一性）[33,126-127]是其形成过程（如碰撞聚积、熔融分异）[127]与后期演化（如撞击改造、空间风化）的核心印记[129-130]，但传统抵近观测仅能通过表面形貌、引力场等间接反演[33,127]，存在显著不确定性。而动能撞击或采样扰动所暴露的不同深度物质，可为风化层厚度、内部结构非均一性、熔融分异历史提供新的观测约束[131-132]。因此，撞击暴露物质的空间分布、光谱特征和结构形态，可填补小行星内部结构直接观测的空白，为修正基于表层数据的内部结构反演模型提供精准验证依据。

暴露的内部物质是解析小行星物质组分原始特征的“天然样本库”。小行星表层物质长期受空间风化（太阳辐射、等离子体轰击、微流星体撞击）影响[130]，其物质组分（如矿物相、元素含量、同位素丰度、挥发性组分）[81,133-135]会发生改变，难以反映小行星形成时的原始状态。而次表层及内部物质受空间风化作用较弱，保留了更原始的物质组分信息：次表层物质可反映早期演化过程中的组分分异规律[131-134]，内部及深部物质则可能携带原始太阳星云凝聚阶段的物质印记[81,135]。通过对暴露的内部物质开展原位光谱探测、成分分析，可精准识别原始矿物相组成、挥发性组分的赋存状态、主量/痕量元素的原始分布，直接对比长期空间风化对小行星表层的改造效应。追溯小行星的物质来源、形成区域与母体演化历史，可验证太阳系早期物质演化理论，完善小行星类型划分的原始依据。

撞击诱发的物质剥离与暴露过程，还为原位测定小行星内部物质力学特性提供了独特场景。小行星内部物质的力学特性（如内聚强度、抗压强度、抗拉强度、剪切强度、弹性模量、剪切模量、宏观孔隙率、微观孔隙率及内摩擦角、石块分布）[33,50,125,127]是决定撞击动量传递效率、轨道偏转效果及小行星结构稳定性的核心参数。动能撞击过程中，内部物质的剥离方式（如结构断裂、挖掘溅射、破碎解体）[50,62,108]、溅射速度与运动轨迹[37,124-125]，直接与内部物质的力学特性相关；同时，通过观测暴露内部物质在后续环境（如自身引力、太阳辐射）中的稳定性表现[21,33,127]，可间接反演其力学参数。通过联合分析撞击坑形态、喷射物羽流演化、碎片分布、轨道偏转量和撞击前后形貌结构变化，建立小行星力学特性的纵向分布模型，为优化冲击动力学仿真参数、提高动能撞击偏转效率预测和提升近地小行星防御方案的精准性提供关键数据支撑。

围绕动能撞击驱动的小行星内部物质探测，可开展的核心科学问题包括：①如何基于撞击能量、小行星表层力学特性，量化预测内部物质的暴露深度与范围；②不同深度暴露物质的结构、组分差异及其与小行星演化过程的关联机制；③如何通过原位探测设备精准捕获暴露内部物质的信号，实现物质组分与力学

特性的高效识别；④撞击诱发的内部物质暴露对小行星动态环境（如尘埃环境、热环境）的影响规律及探测干扰规避策略；⑤如何融合撞击前基线数据、撞击瞬时观测和撞击后中长期监测，构建小行星“表层–次表层–内部”的全维度结构、组分与力学模型。

综上，动能撞击通过主动挖掘实现小行星内部物质暴露，构建“主动诱发–物质暴露–精准探测”的全新研究范式，突破了传统探测手段的局限。对暴露内部物质的系统探测与分析，不仅能精准获取小行星内部结构、组分及力学特性的核心数据，更能为揭示小行星起源与演化规律、提升近地小行星防御任务的科学性与可靠性提供不可或缺的科学支撑。

2.4　动能撞击下的动量传递机制与轨道偏转规律

动能撞击任务实现“推得动”核心目标的关键前提，是理清撞击过程中的动量传递机制与轨道偏转规律。动量传递是撞击能量向小行星轨道运动转化的核心桥梁，轨道偏转规律则是评估任务效能、验证防御策略可行性的核心依据，两者共同构成动能撞击任务的技术核心与科学核心。深入解析这一过程，不仅能精准量化撞击对小行星轨道的改变效应，还能揭示小行星物质属性（如力学特性、结构组成）与动量传递效率的耦合关系，为撞击参数优化、轨道偏转效果精准预测及后续近地小行星防御任务方案设计提供关键理论支撑与数据验证，同时也是解答“说得清”核心科学问题（微重力下的撞击动力学原理）的核心载体。

动能撞击下的动量传递机制是一个多阶段、多物理过程耦合的复杂体系，核心涵盖“直接碰撞动量交换–冲击波介导能量传递–溅射物质反冲动量叠加”三大关键阶段。第一阶段为撞击瞬间的直接动量交换：撞击器以预设速度（通常为km/s量级）与小行星表面碰撞，瞬间将自身动量传递给撞击点周边的表层物质，形成瞬时高压接触区，它的动量传递效率与撞击器质量、撞击速度及撞击角度直接相关[37]。第二阶段为冲击波介导的能量与动量扩散：撞击产生的强冲击波向小行星内部传播，引发冲击压缩、内部结构拉伸破坏、剪切破坏、孔隙压实、裂纹扩展、岩石破碎熔融、挖掘开坑、局部结构坍塌等过程，从而控制撞击坑形成和抛射物产生[125,136]，同时将部分动量从撞击点向小行星整体扩散，使小行星质心获得初始动量改变，此阶段的动量传递效率受小行星内部结构和力学特性显著调控[52,137-138]。第三阶段为溅射物质的反冲动量贡献：撞击引发的表层及次表层物质高速溅射（速度可达m/s～km/s量级），根据动量守恒定律，溅射物质会对小行星产生反向的反冲动量，这部分动量是总传递动量的重要组成，其贡献比例与溅射物质的质量、速度和方向分布直接相关[139]。上述三阶段共同决定了总动量传递效果，而表征这一效果的核心参数为“动量传递因子”，其大小是评估动量传递效率的核心指标。

动量传递机制的解析具有明确的科学价值，核心在于构建“撞击参数–小行星属性–动量传递效率”的定量关联模型。传统冲击动力学研究多基于实验室模拟或数值仿真，难以精准复刻小行星真实物理环境（如低重力、不规则形状、复杂内部结构、不确知的力学特性）；而动能撞击任务提供的原位撞击场景，可通过探测设备捕获撞击瞬间的冲击波传播特征、溅射物质的质量与速度分布，结合预设的撞击参数与已知的小行星物理属性，反向校准动量传递因子的影响因素权重。这不仅能验证并优化现有冲击动力学理论模型，还能填补小尺寸近地小行星（如30 m级）在真实空间环境下动量传递规律的认知空白，为不同类型小行星的撞击动量传递效率预测提供精准依据。

动能撞击引发的轨道偏转规律，是动量传递效果在轨道尺度的直观体现，其核心是小行星轨道参数（半长轴、偏心率、近地点高度等）随时间的演化过程。撞击瞬间小行星获得的动量改变（可达cm/s～dm/s量级的速度增量），会直接导致轨道发生瞬时偏移；随后在太阳系天体引力、太阳光压、Yarkovsky效应、YORP效应等内外因素的共同作用下，轨道偏移量会随时间持续演化。轨道偏转规律的科学价值体现在两方面：一是精准评估任务目标达成度，通过跟踪观测撞击后小行星的轨道演化，验证预设撞击方案的轨道偏转效果是否符合预期，为防御任务的效能评估提供直接依据；二是揭示轨道演化的长期稳定性，通过长期跟踪观测，分析初始轨道偏移量在长期演化中的变化规律，判断撞击产生的偏转效果是否能稳定维持，为规避小行星未来撞击风险提供长期预测支撑。

围绕动量传递机制与轨道偏转规律，可开展的核心科学问题包括：①如何基于小行星的结构材料特性（如不规则形状、内聚强度、抗压强度、抗拉强度、剪切强度、弹性模量、剪切模量、宏观孔隙率、微观孔隙率、内摩擦角、分层结构、表层与次表层石块分布）与撞击参数（速度、角度、撞击器质量、撞击点地形地貌），构建高精度动量传递因子预测模型；②不同深度物质的力学特性差异对冲击波传播与动量扩散的影响机制是什么；③溅射物质的质量与速度分布如何定量影响反冲动量贡献，且该贡献在总传递动量中的占比规律；④如何融合撞击前后的光学、雷达、抵近观测数据，精准提取小行星的轨道偏移量并

区分动量传递与非引力效应的贡献；⑤初始轨道偏转量在长期演化过程中的稳定性规律，及影响轨道偏转效果长期维持的关键因素；⑥不规则形状小行星的非球形引力场对轨道偏转演化的调控作用机制。

综上，动能撞击下的动量传递机制与轨道偏转规律是动能撞击任务的核心研究内容，其解析过程需深度融合冲击动力学、轨道动力学与小行星物理特性等多学科理论。通过动能撞击的原位探测与长期跟踪观测，理清“撞击–动量传递–轨道偏转”的全链条耦合关系，不仅能保障当前任务“推得动、说得清”核心目标的实现，更能为未来近地小行星防御任务的方案优化、效能评估与长期风险预测提供不可或缺的理论与技术支撑。

2.5 比较行星学视角下的撞击物理

基于比较行星学研究撞击过程的核心逻辑，是通过对比不同类型天体，如岩质行星、卫星、小行星和彗星等的撞击现象与物理过程，区分天体专属环境因素与撞击物理普适规律。将小行星动能撞击纳入比较行星学框架，不仅有助于借鉴其它天体撞击研究成果校准小行星撞击物理模型，也能够通过跨天体撞击差异的解析，识别小行星，尤其是小尺寸近地小行星，在低重力、不规则形状、弱强度和碎石堆结构条件下的特殊撞击响应。这一研究视角可将小行星动能撞击置于太阳系撞击演化的宏观背景下，为深化动量传递机制、轨道偏转规律认知，以及优化撞击任务方案提供多源参照与理论支撑。

比较行星学视角下的撞击物理研究，可围绕“撞击环境–撞击过程–撞击效应”三个维度展开。从撞击环境来看，不同天体的撞击过程均受撞击速度、撞击角度、撞击器质量与成分，以及靶体物质组成、结构和力学性质等因素控制，但天体专属环境会显著改变撞击响应：月球、水星等无大气岩质天体的撞击过程不受大气减速、消融和摩擦加热影响，其撞击坑记录可为无大气撞击环境提供参照[140-141]；火星、金星等有大气岩质天体中，撞击器会经历大气减速、消融与破碎，喷射物沉积过程也会受到大气调制[142-144]；木卫二、木卫三和木卫四等冰卫星则因冰质靶体、低温条件、冰壳分层和潜在地下海洋而表现出区别于岩质天体的撞击坑形态与后期演化特征[145-147]；而小尺寸小行星的低重力和低逃逸速度会显著改变喷射物运动轨迹、回落沉积过程和反冲动量贡献效率[21,50,124]。从撞击过程来看，不同类型天体的撞击均遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒基本规律，并经历接触压缩、冲击波传播、靶体损伤破碎、瞬态坑开挖、喷射物形成和最终坑演化等阶段[148-150]；但由于重力、靶体强度、孔隙率、温度条件和内部结构的不同，冲击波衰减、能量分配、喷射物速度分布和撞击坑标度关系会表现出明显的差异[108,151-152]。

从撞击效应来看，小尺度撞击通常引发表面改造，如撞击坑形成、物质剥离、抛射、逃逸和回落沉积，也可能扰动内部结构；更强烈的撞击则可能导致整体形变、灾变破碎或碎片重聚积。对于近地小行星而言，这些效应直接关系到动能撞击任务中的靶体物性反演、动量传递效率预测和轨道偏转效果评估[21,50,108,123,151-152]。

跨天体类型撞击对比的核心科学价值，在于为近地小行星动能撞击研究提供可验证的参照基准与模型校准依据。月球作为无大气、低重力岩质天体，其表面撞击坑形态、尺寸与分布规律[140-141]，以及较成熟的撞击能量–撞击坑参数关联模型[108,151-152]，可为小行星撞击坑标度关系和数值仿真提供基础参照；火星作为具有稀薄大气和低重力的岩质天体[142-144]，其喷射物分布和沉积特征可作为理解小行星喷射物运动规律的对比对象；彗星的多孔疏松结构与部分碳质小行星属性相似，其撞击过程中物质破碎与喷射特征，可辅助完善低强度、高孔隙率或含挥发分小行星靶体的冲击动力学模型[153]。同时，通过对比有大气岩质天体与小行星的撞击差异，可更清晰地识别无大气环境对动量传递效率和喷射物分布的影响。多数近地小行星与主带小行星的动力学逃逸和碎片输运有关[148-149]，其内部结构、碎石堆特征和表面改造状态往往继承了主带母体长期碰撞演化、灾变破碎和碎片重聚积过程的结果[128,150]。因此，主带小行星研究中的破碎解体阈值、强度控制区–重力控制区转换规律、碰撞寿命和撞击通量模型，可为近地小行星动能撞击仿真中的材料本构参数、材料本构模型和靶体结构假设提供重要参照[108,151-152]。

基于比较行星学视角，针对小行星撞击物理可开展的核心科学问题包括：①不同重力环境（从小行星低重力到类地行星高重力）对撞击坑形成、撞击动量传递效率、动量传递因子的定量影响规律，及其对小行星撞击任务参数优化的启示；②无大气天体（小行星、月球、水星）撞击溅射物质的运动与反冲动量贡献共性机制是什么，小行星不规则形状特征和低逃逸速度会如何改变这一共性机制；③不同结构属性靶体（小行星疏松表层/致密内部结构、月球风化层/浅层岩质结构、冰卫星冰壳–海洋–核心结构、彗星多孔冰质结构）的撞击解体阈值与能量分配规律对比，如何为小行星内部物质挖掘深度的预测提供依据；④冰卫星

表面撞击坑形态、中央坑、多环盆地特征如何为理解冰质或富挥发分小天体的撞击响应提供参照；⑤太阳系不同演化阶段的撞击事件（不同演化阶段的撞击通量）对小行星与类地行星表面物质演化、风化层形成与更新的影响差异，及其对小行星原始物质组分保存状态的约束；⑥基于多类型天体撞击坑年代学数据，如何反推小行星撞击历史与太阳系撞击通量演化的关联，进而评估未来小行星遭受自然撞击的风险。

综上，比较行星学视角为小行星撞击物理研究提供了宏观参照与微观校准的双重支撑。通过跨天体撞击环境、过程与效应的系统对比，既能提炼适用于小行星的撞击物理普适规律，又能精准识别其独特性，为动能撞击任务的模型构建、参数优化与效能评估提供多源科学依据。同时，小行星动能撞击的原位探测数据也将反哺比较行星学研究，填补小尺寸、低重力天体撞击物理的认知空白，完善太阳系撞击演化的整体理论框架。

3　结束语

动能撞击作为当前最接近工程可行的小行星防御手段，其在轨演示验证不仅是技术能力的体现，更是推动行星科学与防御技术协同发展的战略契机。中国计划在2030年前实施首次小行星防御在轨演示验证任务，将在世界上首次直接改变一颗等效约30 m的近地小行星相对太阳和地球的轨道，不仅可显著提升近地小行星撞击风险的应对能力，也为开展前沿科学研究提供了前所未有的契机。

在任务设计、实施及科学研究中，建议考虑以下方面：

1）强化“科学牵引−任务验证”双向驱动，构建防御任务新范式。以科学问题牵引任务设计，以在轨实测数据校验理论模型，形成“问题−验证−认知−再设计”的闭环，推动任务从技术演示迈向科学发现与能力建设的深度融合。

2）构建天地协同监测网络，强化前期目标特性观测与建模基础。统筹天基与地基观测资源，在撞击前对目标小行星开展多波段多属性观测。通过数据融合构建高保真数字模型，为任务设计、导航控制和效果预测提供可靠输入。

3）推动撞击物理与防御技术融合，突破超高速撞击动量传递核心机理。基于地面撞击实验与冲击动力学仿真，攻克真实环境下动量传递因子的预测难题。利用在轨数据校验数值模型，为实现“推得动”提供定量化设计与评估依据。

4）贯通“地基观测−抵近探测−建模研究”链条，定量揭示轨道偏转规律。融合全过程观测数据，构建并校准精密轨道演化模型；精确测量撞击偏转量，揭示撞击参数、小行星属性与长期轨道响应之间的定量规律。

5）深化国际合作与数据开放共享，共筑人类命运共同体安全屏障。融入全球监测预警与任务协调体系，推动数据开源与国际协同分析；通过共享成果与联合任务，汇聚全球智慧提升整体防御效能，彰显大国担当。

参考文献

[1] O'KEEFE J D，AHRENS T J. Impact production of CO_2 by the Cretaceous/Tertiary extinction bolide and the resultant heating of the Earth[J]. Nature，1989，338(6212)：247-249.

[2] CHYBA C F，THOMAS P J，ZAHNLE K J. The 1908 Tunguska explosion：atmospheric disruption of a stony asteroid[J]. Nature，1993，361(6407)：40-44.

[3] BOSLOUGH M B E，CRAWFORD D A. Low-altitude airbursts and the impact threat[J]. International Journal of Impact Engineering，2008，35(12)：1441-1448.

[4] BOROVIČKA J，SPURNÝ P，BROWN P，et al. The trajectory，structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor[J]. Nature，2013，503(7475)：235-237.

[5] ZHAO J，LI M，GENG S，et al. Asteroid 2024 YR4：a comprehensive impact risk analysis with the SHARP-TWS system[EB/OL]. [2026-05-10]. Space：Science & Technology. https：//spj.science.org/doi/abs/10.34133/space.0437.

[6] FARNOCCHIA D，FENUCCI M，BERNARDI F，et al. The impact hazard assessment for near-Earth asteroid 2024 YR4[J]. The Journal of the Astronautical Sciences，2026，73(2)：28-36.

[7] 龚自正，李明，陈川，等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术[J]. 科学通报，2020，65(5)：346-372.
GONG Z Z，LI M，CHEN C，et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning，security defense and resource utilization[J]. Chinese Science Bulletin，2020，65(5)：346-372.

[8] 吴伟仁，龚自正，唐玉华，等. 近地小行星撞击风险应对战略研究[J]. 中国工程科学，2022，24(2)：140-151.
WU W R，GONG Z Z，TANG Y H，et al. Response to risk of Near-Earth asteroid impact[J]. Strategic Study of CAE，2022，24(2)：140-151.

[9] 唐玉华，吴伟仁，李明涛，等. 地月空间近地小行星观测系统研究[J]. 中国科学：信息科学，2022，52(7)：1169-1185.
TANG Y H，WU W R，LI M T，et al. Near-Earth asteroids observation system in cislunar space[J]. Science in China(Information Sciences)，2022，52(7)：1169-1185.

[10] LI M，WANG K. Progress of planetary defense research in China[J]. Chinese Journal of Space Science，2022，42(4)：830-839.

[11] 王楷铎. 动能撞击防御小行星任务轨道优化与偏转效能分析[D]. 北京：中国科学院国家空间科学中心，2025.

[12] KOFLER R，DROLSHAGEN G，DRUBE L，et al. International coordination on planetary defence：the work of the IAWN and the

SMPAG[J]. Acta Astronautica，2019，156：409-415.

[13] KOSCHNY D V，FAST K E，KOFLER R. About the International Asteroid Warning Network (IAWN) and the Space Mission Planning Advisory Group (SMPAG)[J]. Nature Communications，2024，15(1)：4816-4827.

[14] IVASHKIN V V，SMIRNOV V V. An analysis of some methods of asteroid hazard mitigation for the Earth[J]. Planetary and Space Science，1995，43(6)：821-825.

[15] 吴伟仁，唐玉华，李明涛. 小行星防御在轨处置技术研究进[J]. 深空探测学报(中英文)，2023，10(4)：345-356.
WU W R，TANG Y H，LI M T，et al. Research progress in asteroid defense on-orbit disposal technology[J]. Journal of Deep Space Exploration，2023，10(4)：345-356.

[16] IZZO D. Optimization of interplanetary trajectories for impulsive and continuous asteroid deflection[J]. Journal of guidance，control，and dynamics，2007，30(2)：401-408.

[17] AHRENS T J，HARRIS A W. Deflection and fragmentation of near-Earth asteroids[J]. Nature，1992，360(6403)：429-433.

[18] DALY R T，ERNST C M，BARNOUIN O S，et al. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence[J]. Nature，2023，616(7957)：443-447.

[19] WU W R，TANG Y H，HAN S Y，et al. Analysis of on-orbit test missions for asteroid kinetic impact[J]. Chinese Science Bulletin，2026，71(17)：3885-3895.

[20] WANG K，LI M，ZHOU Q，et al. Targets selection and mission optimization of kinetic impact deflection test mission for small size asteroids[J]. Advances in Space Research，2023，72(8)：3477-3498.

[21] CHENG A F，AGRUSA H F，BARBEE B W，et al. Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos[J]. Nature，2023，616(7957)：457-460.

[22] CHABOT N L，RIVKIN A S，CHENG A F，et al. Achievement of the planetary defense investigations of the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission[J]. The Planetary Science Journal，2024，5(2)：49-58.

[23] HATCH P，WIEGERT P A. On the rotation rates and axis ratios of the smallest known near-Earth asteroids—The archetypes of the Asteroid Redirect Mission targets[J]. Planetary and Space Science，2015，111：100-104.

[24] 龚自正，宋光明，陈川，等. 我国应对近地小行星撞击风险和动能撞击偏转研究的若干进展[J]. 上海航天(中英文)，2024，41(5)：11-23.
GONG Z Z，SONG G M，CHEN C，et al. China Response to risk of NEA and kinetic energy impact deflection researches：retrospect and prospect[J]. Aerospace Shanghai，2024，41(5)：11-23.

[25] 张东亮，李世杰，沈德汗，等. 小行星的起源、物理化学特性及其与防御的关联[J]. 科学通报，2026，71(17)：3858-3871.
ZHANG D L，LI S J，SHEN D H，et al. The origin，physical and chemical properties of asteroids，and their association with defense[J]. Chinese Science Bulletin，2026，71(17)：3858-3871.

[26] DEMEO F E，CARRY B. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt[J]. Nature，2014，505(7485)：629-634.

[27] 赵坚，张如生，李明涛，等. 近地小行星监测预警六度分析框架[J]. 科学通报，2023，68(8)：981-992.
ZHAO J，ZHANG R S，LI M T，et al. Six-degree analysis framework for near-Earth asteroids monitoring and warning[J]. Chinese Science Bulletin，2023，68(8)：981-992.

[28] 邹永廖，薛长斌，贾瑛卓，等. 小行星防御试验任务科学目标设计与有效载荷配置[J]. 深空探测学报(中英文)，2024，11(2)：169-176.
ZHOU Y L，XUE C B，JIA Y Z，et al. Scientific objectives and configuration payloads of asteroid defense test missions[J]. Journal of Deep Space Exploration，2024，11(2)：169-176.

[29] BOTTKE JR W F，VOKROUHLICKÝ D，RUBINCAM D P，et al. The Yarkovsky and YORP effects：implications for asteroid dynamics[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences，2006，34(1)：157-191.

[30] JEWITT D. The active asteroids[J]. The Astronomical Journal，2012，143(3)：66-78.

[31] VOKROUHLICKÝ D，BOTTKE W F，CHESLEY S R，et al. The Yarkovsky and YORP effects[J/OL]. Physics，2015:118367595. https://www.semanticscholar.org/paper/The-Yarkovsky-and-YORP-Effects-Vokrouhlick%C3%BD-Bottke/5f20b129bcee5e767dcae108724d8c66a3b2ac35.

[32] LAURETTA D S. Episodes of particle ejection from the surface of the active asteroid (101955) Bennu[J]. Science，2019，366(6)：1217-1218.

[33] ZHANG Y，MICHEL P，BARNOUIN O S，et al. Inferring interiors and structural history of top-shaped asteroids from external properties of asteroid (101955) Bennu[J/OL]. Nat Commun，2022：4589(2022). https：//www.nature.com/articles/s41467-022-32288-y?fromPaywallRec=true .

[34] SCHEERES D J，MCMAHON J W，FRENCH A S，et al. The dynamic geophysical environment of (101955) Bennu based on OSIRIS-REx measurements[J]. Nat Astron，2019，3：352-361.

[35] KEVIN J W，DEREK C R，PATRICK M，Et al. Spin-up of rubble-pile asteroids：Disruption，satellite formation，and equilibrium shapes[J]. Icarus，2012，220(2)：514-529.

[36] CHANDLER C O，TRUJILLO C A，OLDROYD W J，et al. The active asteroids citizen science program：overview and first results[J]. The Astronomical Journal，2024，167(4)：156-162.

[37] LI J Y，HIRABAYASHI M，FARNHAM T L，et al. Ejecta from the DART-produced active asteroid Dimorphos[J]. Nature，2023，616(7957)：452-456.

[38] KIM Y，ISHIGURO M，USUI F. Physical properties of asteroids in comet-like orbits in infrared asteroid survey catalogs[J]. The Astrophysical Journal，2014，789(2)，151：160.

[39] LAURETTA D S，DELLAGIUSTINA，D N，BENNETT C A. et al. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu[J]. Nature，2019，568：55-60.

[40] ROZITIS B. Implications for ice stability and particle ejection from high‐resolution temperature modeling of asteroid (101955) Bennu[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2020，125(8)：1-16.

[41] MOLARO J L，HERGENROTHER C W，CHESLEY S R，et al. Thermal fatigue as a driving mechanism for activity on asteroid Bennu[J/OL]. Journal of Geophysical Research：Planets，2020，125(8)：2019JE006325. https：//pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32999800/.

[42] HERGENROTHER C W，MALESZEWSKI C，LI J Y，et al. Photometry of particles ejected from active asteroid (101955) Bennu[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2020，125(9)：2020JE006381-1-2020JE006381-29.

[43] 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[J]. Nature Geoscience，2019，12(4)：242-246.

[44] BUSAREV，V V，MAKALKIN A B，VILAS F，et al. New candidates for active asteroids：Main-belt (145) Adeona，(704) Interamnia，(779)

Nina，(1474) Beira，and near-Earth (162，173) Ryugu[J]. Icarus，2018，304：83-94.

[45] SUTTLE M D，OLBRICH L F，BAYS C L，et al. Rapid heating rates define the volatile emission and regolith composition of (3200) Phaethon[EB/OL]. [2026-05-10]. Nature Communications. https://www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=07d8709e3a129534be7a96d017f8686a.

[46] BOTTKE W F，MOORHEAD A V，CONNOLLY H C，et al. Meteoroid impacts as a source of Bennu's particle ejection events[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2020，125(8)：2019JE006282-112019JE006282-16.

[47] WALSH K J，BALLOUZ R L，BOTTKE W F，et al. Numerical simulations suggest asteroids (101955) Bennu and (162173) Ryugu are likely second or later generation rubble piles[J/OL]. Nature Communications, 2014, 15: 5653. https://doi.org/10.1038/s41467-024-49310-0.

[48] MICHEL P，BALLOUZ R L，BARNOUIN O S，et al. Collisional formation of top-shaped asteroids and implications for the origins of Ryugu and Bennu[J/OL]. Nature Communications，2002，2655(11)：16433. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16433-z.

[49] BARNES J J，NGUYEN A N，ABERNETHY F A J，et al. The variety and origin of materials accreted by Bennu's parent asteroid[J]. Nature Astronomy，2025(9)：1785-1802.

[50] RADUCAN S D，JUTZI M，CHENG A F，et al. Physical properties of asteroid Dimorphos as derived from the DART impact[J]. Nature Astronomy，2024(8)：445-455 .

[51] 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.

[52] STICKLE A M，DECOSTER M E，BURGER C C，et al. (2022). Effects of impact and target parameters on the results of a kinetic impactor：predictions for the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission[J]. The Planetary Science Journal，2022，3(11)：248-277.

[53] VINCENT J B，ASPHAUG E，BARNOUIN O，et al. Macroscale roughness reveals the complex history of asteroids Didymos and Dimorphos[J]. The Planetary Science Journal，2024，5(10)：236-251.

[54] DECOSTER M E，LUTHER R，COLLINS G S，et al. The relative effects of surface and subsurface morphology on the deflection efficiency of kinetic impactors：implications for the DART mission[J]. The Planetary Science Journal，2024，5(1)：21-24.

[55] DECOSTER M E，STICKLE A M，RAINEY E S，et al. Statistical analysis of near-surface structure and material properties on momentum transfer in rubble pile targets impacted by kinetic impactors[J]. The Planetary Science Journal，2024，5(11)：244-259.

[56] STICKLE A M，KUMAMOTO K M，GRANINGER D M，et al. Dimorphos's material properties and estimates of crater size from the DART impact[J]. The Planetary Science Journal，2025，6(2)：38-52.

[57] RADUCAN S D，JUTZI M，MERRILL C C，et al. Lessons learned from NASA's DART impact about disrupting rubble-pile asteroids[J]. The Planetary Science Journal，2024，5(3)：79-90.

[58] STATLER T S，RADUCAN S D，BARNOUIN O S，et al. After DART：using the first full-scale test of a kinetic impactor to inform a future planetary defense mission[J]. The planetary Science Journal，2022，3(10)：244-256.

[59] RADUCAN S D，DAVISON T M，COLLINS G S. Ejecta distribution and momentum transfer from oblique impacts on asteroid surfaces[J/OL]. Icarus，2022，374：114793. https://www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=ace414124a0ff49766d0c74e926c7805.

[60] JEWITT D，KIM Y，LI J，et al. The Dimorphos boulder swarm[J]. The Astrophysical Journal Letters，2023，952(1)：L12-26.

[61] ARAKAWA M. An artificial impact on the asteroid (162173) Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime[J]. Science，2020，368：67-71.

[62] JUTZI M，RADUCAN S D，ZHANG Y，et al. Constraining surface properties of asteroid (162173) Ryugu from numerical simulations of Hayabusa2 mission impact experiment[J/OL]. Nature Communication，2020，13：7134. https://doi.org/10.1038/s41467-022-34540-x.

[63] RADUCAN S D，JUTZI M. Global-scale reshaping and resurfacing of asteroids by small-scale impacts，with applications to the DART and Hera missions[J]. The Planetary Science Journal，2020，3(6)：128-143.

[64] ZHANG Y，MICHEL P. Tidal distortion and disruption of rubble-pile bodies revisited-Soft-sphere discrete element analyses[J]. Astronomy & Astrophysics，2020，640：A102-A118.

[65] BARNOUIN O S，DALY M G，PALMER E E，et al. Shape of (101955) Bennu indicative of a rubble pile with internal stiffness[J/OL]. Nature Geoscience. 2019(12)：s41561. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0330-x.

[66] LEVISON H F，MARCHI S，NOLL K S，et al. A contact binary satellite of the asteroid (152830) Dinkinesh[J]. Nature，2024，629：1015-1020.

[67] RADUCAN S D，MADEIRA G，AGRUSA H F，et al. Multiple moonlet mergers as the origin of the Dinkinesh-Selam system[J/OL]. Nature Communicaitons，2025(16)：11033. https://doi.org/10.1038/s41467-025-66484-3.

[68] DAI W Y，CHENG B，HUANG Y，et al. Diverse configurations of binary asteroids explained by multi-generation satellites[J/OL]. Nature Communications，2026：s41467. https://doi.org/10.1038/s41467-026-73703-y.

[69] FUJIWARA A. The Rubble-Pile asteroid itokawa as observed by Hayabusa[J]. Science，2006，312：1330-1334.

[70] CHENG B，YU Y，ASPHAUG E，et al. Reconstructing the formation history of top-shaped asteroids from the surface boulder distribution[J]. Nature Astronomy，2021(5)：134-138.

[71] SUGITA S. The geomorphology，color，and thermal properties of Ryugu：Implications for parent-body processes[J/OL]. Science，2019，364：eaaw0422. https://doi.org/10.1126/science.aaw0422.

[72] 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[J]. Nature，2020，587：205-209.

[73] CHO Y，MOROTA T，KANAMARU M，et al. Geologic history and crater morphology of asteroid (162173) Ryugu[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2021，126(8)：e2020JE006572-1-e2020JE006572-27.

[74] ZHOU W H，ZHANG Y，YAN X，et al. The crater-induced YORP effect[J]. Astronomy & Astrophysics，2022，668：A70-A81.

[75] ŠEVEČEK P，BROŽ M，ČAPEK D，et al. The thermal emission from boulders on (25143) Itokawa and general implications for the YORP effect[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society，2015，450(2)：2104-2115.

[76] DIBB S D，BELL J F，ELKINS-TANTON L T，et al. Visible to near-infrared reflectance spectroscopy of asteroid (16) Psyche：Implications for the Psyche mission's science investigations[J/OL]. Earth and

Space Science，2023，10：e2022EA002694. https://doi.org/10.1029/2022EA002694.

[77] ZHANG P，ZHANG G，WEI Z，et al. Tianwen-2 mission target asteroid（469219）Kamo‘oalewa probably develops an Itokawa-compositional but more space-weathered surface[J/OL]. Nature Communications，2026：73284. https://doi.org/10.1038/s41467-026-73284-w.

[78] DELBO M，MUELLER M，EMERY J P，et al. Asteroid thermophysical modeling[J]. Asteroids IV，2015(1)：107-128.

[79] DELLAGIUSTINA D N，EMERY J P，GOLISH D R，et al. Properties of rubble-pile asteroid（101955）Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis[J]. Nature Astronomy，2019，3(4)：341-351.

[80] ITO M，TOMIOKA N，UESUGI M，et al. A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu’s returned sample[J]. Nature Astronomy，2022，6(10)：1163-1171.

[81] GLAVIN D P，DWORKIN J P，ALEXANDER C M O，et al. Abundant ammonia and nitrogen-rich soluble organic matter in samples from asteroid（101955）Bennu[J]. Nature Astronomy，2025，9(2)：199-210.

[82] DEMEO F E，BURT B J，MARSSET M，et al. Connecting asteroids and meteorites with visible and near-infrared spectroscopy[J/OL]. Icarus，2022，380：114971. https：//www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=43fd059f1b4e53280921a7eb2d5a12cf.

[83] CAMPINS H，HARGROVE K，PINILLA-ALONSO N，et al. Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 Themis[J]. Nature，2010，464：1320-1321 .

[84] MARSSET M，VERNAZZA P，BROŽ M，et al. The Massalia asteroid family as the origin of ordinary L chondrites[J]. Nature，2024，634：561-565.

[85] BARNOUIN O，BALLOUZ R L. ，MARCHI S，et al. The geology and evolution of the Near-Earth binary asteroid system（65803）Didymos[J/OL]. Nature Communicaitons，2024，15：6202. https://doi.org/10.1038/s41467-024-50146-x.

[86] BROŽ M，VERNAZZA P，MARSSET M，et al. Young asteroid families as the primary source of meteorites[J]. Nature，2024，634：566-571.

[87] TAKIR D，EMERY J P，BOTTKE W F，et al. Origin of asteroid（101955）Bennu and its connection to the New Polana family[J/OL]. Science Report，2024，14：15965. https://doi.org/10.1038/s41598-024-66237-0.

[88] KRUIJER T S，BURKHARDT C，BUDDE G，et al. Age of Jupiter inferred from the distinct genetics and formation times of meteorites[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2017，114(26)：6712-6716.

[89] ZAPPALÀ V，CELLINO A，DELL’ORO A，et al. Physical and dynamical properties of asteroid families[M]. Tucson：University of Arizona ，2002.

[90] KLEINE T，BUDDE G，BURKHARDT C，et al. The Non-carbonaceous–carbonaceous meteorite dichotomy[J/OL]. Space Science Reviews，2020，216(4)：00675. https://doi.org/10.1007/s11214-020-00675-w.

[91] YU J，KUROKAWA H，TAKI T. Testing the icy pebble accretion hypothesis with primordial main-belt asteroids[J]. The Astrophysical Journal，2026，1001(1)：1-17.

[92] LAMBRECHTS M，JOHANSEN A. Rapid growth of gas-giant cores by pebble accretion[J]. Astronomy & Astrophysics，2012，544：A32-A41.

[93] WALSH K，MORBIDELLI A，RAYMOND S，et al. A low mass for Mars from Jupiter’s early gas-driven migration[J]. Nature，2011，475：206-209.

[94] ORMEL C W，& KLAHR H H. The effect of gas drag on the growth of protoplanets-analytical expressions for the accretion of small bodies in laminar disks[J]. Astronomy & Astrophysics，2010，520：A43-A54.

[95] MORBIDELLI A，LUNINE J I，O'BRIEN D P，et al. Building terrestrial planets[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences，2012，40(1)：251-275.

[96] MICHEL P，RICHARDSON D C，DURDA D D，et al. Collisional formation and modeling of asteroid families[J]. Asteroids IV，2015，21(2)：341-354.

[97] MCSWEEN H Y，BINZEL JR R P，SANCTIS D M C，et al. Dawn; the Vesta–HED connection; and the geologic context for eucrites，diogenites，and howardites[J]. Meteorit Planet Science，2013，48：2090-2104.

[98] SÁNCHEZ P，SCHEERES D J，The strength of regolith and rubble pile asteroids[J]. Meteoritics & Planetary Science，2014，49(5)：788-811.

[99] GRANVIK M，WALSH K J. Tidal disruption of near-Earth asteroids during close encounters with terrestrial planets[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters，2024，960(2)：L9. https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad151b.

[100] LUCCHETTI A，CAMBIONI S，NAKANO R，et al. Fast boulder fracturing by thermal fatigue detected on stony asteroids[J/OL]. Nature Communications，2024，15(1)：6206. https：//www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=07ca9c366c8a22374d1f4ee918fcdb76.

[101] MOLARO J L. ，WALSH K J，JAWIN E R，et al. In situ evidence of thermally induced rock breakdown widespread on Bennu’s surface[J/OL]. Nature Communicaiton，2020，11：2913. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16528-7.

[102] DELBO M，WALSH K J，MATONTI C，et al. Alignment of fractures on Bennu’s boulders indicative of rapid asteroid surface evolution[J]. Nature Geoscience，2022，15：453-457.

[103] ARAKAWA M. A weak and active surface of Bennu[J]. Nature Geoscience，2022，15：430-431.

[104] ROBIN C Q，DUCHENE A，MURDOCH N. et al. Mechanical properties of rubble pile asteroids（Dimorphos，Itokawa，Ryugu，and Bennu）through surface boulder morphological analysis[J/OL]. Nature Communication，2024，15：6203. https://doi.org/10.1038/s41467-024-50147-w.

[105] POHL L，BRITT D T. Strengths of meteorites—an overview and analysis of available data[J]. Meteorit Planet Science，2020，55：962-987.

[106] GROTT M，BIELE J，MICHEL P，et al. Macroporosity and grain density of rubble pile asteroid（162173）Ryugu[J/OL]. Journal of Geophysical Research：Planets，2020，125：e2020JE006519. https://doi.org/10.1029/2020JE006519.

[107] HOUSEN K R，HOLSAPPLE K A. Scale effects in strength-dominated collisions of rocky asteroids[J]. Icarus，1999，142(1)：21-33.

[108] JUTZI M，MICHEL P，BENZ W. Fragment properties at the catastrophic disruption threshold：the effect of the parent body’s internal structure[J]. Icarus，2010，207(1)：54-65.

[109] KEVIN J. Near-zero cohesion and loose packing of Bennu’s near subsurface revealed by spacecraft contact[J/OL]. Science Advances，2022(8)：6229. https：//doi.10.1126/sciadv.abm6229.

[110] MASIERO J R，WRIGHT E L，MAINZER A K，et al. Uncertainties on asteroid albedos determined by thermal modeling[J]. The Planetary Science Journal，2021，2(1)：32-27.

[111] ROZITIS B. Asteroid (101955) Bennu's weak boulders and thermally anomalous equator[J/OL]. Science. Advance，2002，6：3699. https://doi.org.10.1126/sciadv.abc3699.

[112] GROTT M，KNOLLENBERG J，HAMM M，et al. Low thermal conductivity boulder with high porosity identified on C-type asteroid (162173) Ryugu[J]. Nature Astronomy，2019，3：971-976.

[113] RYAN A J，PINO MUÑOZ D，BERNACKI M，et al. Full-field modeling of heat transfer in asteroid regolith：2. Effects of porosity[J/OL]. Journal of Geophysical Research：Planets，2022，127：e2022JE007191. https://doi.org/10.1029/2022JE007191.

[114] ROZITIS B，DUDDY S R，GREEN S F，et al. A thermophysical analysis of the (1862) Apollo Yarkovsky and YORP effects[J]. Astronomy & Astrophysics，2013，555：A20-A32.

[115] ĎURECH J，VOKROUHLICKÝ D，PRAVEC P，et al. YORP and Yarkovsky effects in asteroids (1685) Toro，(2100) Ra-Shalom，(3103) Eger，and (161989) Cacus[J]. Astronomy & Astrophysics，2018，609：A86-A95.

[116] WERNER R A，SCHEERES D J. Exterior gravitation of a polyhedron derived and compared with harmonic and mascon gravitation representations of asteroid 4769 Castalia[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy，1996，65(3)：313-344.

[117] SCHEERES D J，FRENCH A S，TRICARICO P，et al. Heterogeneous mass distribution of the rubble-pile asteroid (101955) Bennu[J/OL]. Science advances，2020，6(41)：eabc3350. https://www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=c1a4271f102db1dcefa113065cbae353.

[118] WANG Z，KIVELSON M G. Asteroid interaction with solar wind[J]. Journal of Geophysical Research：Space Physics，1996，101(A11)：24479-24493.

[119] HARTZELL C M，SCHEERES D J. Dynamics of levitating dust particles near asteroids and the Moon[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2013，118(1)：116-125.

[120] WEISS B P，GATTACCECA J，STANLEY S，et al. Paleomagnetic records of meteorites and early planetesimal differentiation[J]. Space Science Reviews，2010，152(1)：341-390.

[121] ACUÑA M H，ANDERSON B J，RUSSEll C T，et al. NEAR magnetic field observations at 433 Eros：first measurements from the surface of an asteroid[J]. Icarus，2002，155(1)：220-228.

[122] SZALAY J R，HORÁNYI M. The impact ejecta environment of near Earth asteroids[J]. The Astrophysical Journal Letters，2016，830(2)：L29-L34.

[123] MOORHEAD A V，KINGERY A，EHLERT S. NASA's meteoroid engineering model 3 and its ability to replicate spacecraft impact rates[J]. Journal of Spacecraft and Rockets，2020，57(1)：160-176.

[124] FERRARI F，RADUCAN S D，SOLDINI，et al. Ejecta formation，early collisional processes，and dynamical evolution after the DART impact on Dimorphos[J]. The Planetary Science Journal，2022，3(7)：177-187.

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

[126] PAJOLA M，TUSBERTI F，LUCCHETTI A，et al. Evidence for multi-fragmentation and mass shedding of boulders on rubble-pile binary asteroid system (65803) Didymos[J]. Nature Communications，2024，15：6205-6214.

[127] BALLOUZ R L. RICHARDSON J E，WALSH K J，et al. Seismic resurfacing of 433 Eros indicative of a highly dissipative interior for large near-Earth asteroids[J]. Nature Astronomy，2025，9：347-357.

[128] MICHEL P，BENZ W，TANGA P，et al. Collisions and gravitational reaccumulation：forming asteroid families and satellites[J]. Science，2001，294(5547)：1696-1700.

[129] TAKAKI N，CHO Y，MOROTA T，et al. Resurfacing processes constrained by crater distribution on Ryugu[J/OL]. Icarus，2022，377：114911. https://www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=ca7fe8f23168172d8de038d0ec069b37.

[130] PIETERS C M，NOBLE S K. Space weathering on airless bodies[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2016，121：1865-1884.

[131] LAURETTA D S，DALY M G，BARNOUIN O S，et al. Spacecraft sample collection and subsurface excavation of asteroid (101955) Bennu[J]. Science，2022，377(6603)：285-291.

[132] KITAZATO K，MILLIKEN R E，IWATA T，et al. Thermally altered subsurface material of asteroid (162173) Ryugu[J]. Nature Astronomy，2021，5(3)：246-250.

[133] YADA T，ABE M，OKADA T，et al. Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu[J]. Nature Astronomy，2021，6：214-220.

[134] PILORGET C，OKADA T，HAMM V，et al. First compositional analysis of Ryugu samples by the MicrOmega hyperspectral microscope[J]. Nature Astronomy，2022，6：221-225.

[135] PILORGET C，OKADA T，BIBRING J P，et al. Bennu and Ryugu constituents from samples IR analyses and potential source of terrestrial planets' ingredients[J/OL]. Nature Communications，2025，16：9532. https://www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=c6b2acad9ad126a02101ec93ceb8847c.

[136] KUMAMOTO K M，OWEN J M，SYAL M B，et al. Predicting asteroid material properties from a DART-like kinetic impact[J]. The Planetary Science Journal，2022，3(10)：237-245.

[137] BUHL E，SOMMER F，POELCHAU M H，et al. Ejecta from experimental impact craters：Particle size distribution and fragmentation energy[J]. Icarus，2014，237：131-142.

[138] HIRABAYASHI M，RADUCAN S D，SUNSHINE J M，et al. Elliptical ejecta of asteroid Dimorphos is due to its surface curvature[J/OL]. Nature Communications，2025，16：1602. https://doi.org/10.1038/s41467-025-56010-w.

[139] THOMAS C A，NAIDU S P，SCHEIRICH P，et al. Orbital period change of Dimorphos due to the DART kinetic impact[J]. Nature，2023，616：448-451.

[140] NESVORNÝ D，ROIG F V，VOKROUHLICKÝ D，et al. Early bombardment of the Moon：connecting the lunar crater record to terrestrial planet formation[J]. Icarus，2023，399：115545-115568.

[141] OETTING A，FASSETT C I，MINTON D A，et al. Slopes of lunar crater size-frequency distributions at kilometer scales[J/OL]. Journal of Geophysical Research：Planets，2023，128：e2023JE007816. https://doi.org/10.1029/2023JE007816.

[142] COLLINS G S，LUTHER R，DAVISON T M，et al. Meteoroid fragmentation in the Martian atmosphere and the formation of crater clusters[J/OL]. Journal of Geophysical Research：Planets，2022，127：e2021JE007149. https://doi.org/10.1029/2021JE007149.

[143] KORYCANSKY D G，ZAHNLE K J，MAC LOW M M. High-resolution calculations of asteroid impacts into the Venusian atmosphere[J]. Icarus，2000，146：387-403.

[144] LUTHER R，ARTEMIEVA N，WÜNNEMANN K. The effect of atmospheric interaction on impact ejecta dynamics and deposition[J].

Icarus，2019，333：71-86.

[145] SILBER E A，JOHNSON B C. Impact crater morphology and the structure of Europa's ice shell[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2017，122：2685-2701.

[146] BJONNES E E，JOHNSON B C，SILBER E A，et al. Ice shell structure of Ganymede and Callisto based on impact crater morphology[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2022，127(4)：2021JE007028-1-2021JE007028-14.

[147] WHITE O L，MOORE J M，SCHENK P M，et al. Large impact features on Ganymede and Callisto as revealed by geological mapping and morphometry[J/OL]. Icarus，2025，426：116357. https：//www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=d4b000518695c2a0d973d6d03897b54c.

[148] MELOSH H J. Impact cratering: a geologic process[M]. New York: Oxford University Press, 1989.

[149] MELOSH H J, IVANOV B A. Impact crater collapse[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences，1999，27：385-415.

[150] JUTZI M, HOLSAPPLE K, WÜNNEMANN K. et al. Modeling asteroid collisions and impact processes[EB/OL]. (2015)[2026-05-03]. Asteroids IV, https://www.zhangqiaokeyan.com/open-access_resources_thesis/0100091045725.html.

[151] BENZ W，ASPHAUG E. Catastrophic disruptions revisited[J]. Icarus，1999，142：5-20.

[152] HOUSEN K R，HOLSAPPLE K A. On the fragmentation of asteroids and planetary satellites[J]. Icarus，1990，84：226-253.

[153] A'HEARN M F，BELTON M J S，DELAMERE W A，et al. Deep Impact：excavating comet tempel 1[J]. Science，2005，310：258-264.

作者简介：

李明涛(1982–)，男，研究员，博士生导师，主要研究方向：小行星防御与利用、航天器轨道动力学。

通信地址：北京市朝阳区大屯路甲20号国家航天局小行星监测预警研究中心(100101)

E-mail：limingtao@ucas.ac.cn

王赤(1967–)，男，研究员，中国科学院院士，主要研究方向：空间物理、空间天气。**本文通信作者**。

通信地址：北京市海淀区中关村南二条一号中国科学院国家空间科学中心(100190)

电话：(010)62582763

E-mail：cw@nssc.ac.cn

Frontier Scientific Issues in Kinetic Impact Asteroid Defense

LI Mingtao[1,3]，WANG Kaiduo[2]，ZHOU Qi[2,3]，WANG Chi[2,3]

（1. Asteroid Survey Track and Early-warning Research Center，China National Space Administration，Beijing 100101，China；
2. National Space Science Center，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100190，China；
3. University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China）

Abstract：Kinetic impact is regarded as the most technically feasible method for asteroid defense. Conducting an on-orbit demonstration and verification mission would not only enhance the technological maturity of kinetic-impact deflection，but also reveal the orbital deflection behavior of near-Earth asteroids，thereby providing decision-making support for future responses to real near-Earth asteroid impact threats. The orbital dynamical characteristics and structural，physical，and chemical properties of near-Earth asteroids are critical to the successful implementation of kinetic-impact missions. At the same time，such missions would provide an unprecedented opportunity to investigate the internal structure，composition，and mechanical properties of near-Earth asteroids. In addition，kinetic impact would serve as a unique "natural experiment，" offering a key case study for impact physics from the perspective of comparative planetology and thereby promoting the coordinated development of planetary science and planetary defense technologies. Focusing on China's first asteroid defense demonstration and verification mission planned before 2030，this paper systematically reviews the frontier scientific questions in kinetic-impact asteroid defense，with the aim of providing a reference for mission design，implementation，and preliminary scientific research.

Keywords：asteroid；asteroid defense；kinetic impact；frontier scientific issues

Highlights：

- Frontier scientific issues in kinetic-impact asteroid defense are systematically reviewed.
- Orbital dynamics and target properties are critical to the success of kinetic-impact missions.
- Kinetic impact provides a unique opportunity to probe the internal structure and mechanical properties of near-Earth asteroids.
- Momentum transfer and orbital deflection behavior are central scientific questions for assessing deflection effectiveness.
- A comparative planetology perspective can advance the theoretical understanding of asteroid impact physics.
- China's first asteroid defense demonstration mission will provide a key case study for planetary defense research.

[责任编辑：高莎，英文审校：宋利辉]