

复杂撞击条件下撞击坑形成机制研究进展*

马静添^{1,2}, 吕赫¹, 陈小伟¹

(1.北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081;

2.北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要: 天体撞击是太阳系天体表面演化与形貌改造的重要过程之一。自然撞击事件通常表现为斜撞击, 并常发生于具有复杂地形和非均质结构的靶体。为梳理复杂撞击条件下撞击坑形成机制的研究进展, 认识撞击角度、地形和靶体性质对成坑过程及喷射物运动的影响, 系统了综述斜撞击、地形、孔隙介质、分层结构和节理裂隙条件下的撞击成坑研究。在概述撞击成坑实验、数值模拟方法和经典相似律的基础上, 总结垂直撞击与斜撞击条件下喷射物运动的基本理论, 归纳不同因素对成坑过程、喷射物分布和相似律的主要影响。已有研究表明, 斜撞击使冲击压力场与能量沉积分布偏离轴对称, 改变瞬态坑演化、最终坑形态及喷射物运动; 起伏地形通过改变局部撞击几何关系和重力驱动的物质迁移, 影响坑壁坍塌与喷射物沉积; 孔隙压实增强能量耗散, 改变冲击波衰减和成坑效率; 分层界面与节理裂隙通过影响波传播、材料破坏及变形路径, 改变坑体结构与喷射物分布。现有研究揭示了不同复杂条件对撞击成坑的影响, 但对多因素耦合作用的认识仍不充分, 且存在靶体参数表征不统一、实验—数值—自然尺度转换困难及相似律适用边界不清等问题。未来需加强斜撞击与复杂靶体耦合条件下的系统实验, 结合高分辨率三维数值模拟与行星观测, 深化对复杂条件下成坑机制的认识, 明确相似律的适用范围, 发展面向自然撞击场景的定量预测模型。

关键词: 撞击坑; 斜撞击; 靶体地形; 分层结构; 喷射物; 成坑相似律

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Research progress in the formation mechanisms of impact craters under complex impact conditions

MA Jingtian^{1,2}, LV He¹, CHEN Xiaowei¹

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

2. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Impact cratering is an important geological process that shapes the surface morphology of planets and small bodies. Conventional cratering theories and scaling relationships were largely developed for vertical impacts into flat, homogeneous targets, limiting their applicability to natural events. To summarize advances in impact cratering under complex conditions and clarify the influences of impact angle, topography, and target properties on crater formation and ejecta distribution, a literature review was conducted. Laboratory impact experiments, numerical simulation methods, and classical scaling laws were first summarized to provide the theoretical and methodological context. Theoretical descriptions of ejection motion under vertical and oblique impacts were then outlined. Published findings were organized according to impact obliquity, surface topography, porosity, layering, and preexisting joints and fractures. For impact obliquity, the reported effects on shock pressure distribution, transient crater evolution, final crater morphology, ejecta distribution, and scaling laws were reviewed. For topography and

*收稿日期: 2026-09-16; 修回日期: 2026-10-19;

基金项目: 国家自然科学基金(12372346、12432018); 国家自然科学基金创新群体项目(12221002)

第一作者: 马静添(1998—), 女, 博士研究生. E-mail: 2727871820@qq.com;

通信作者: 陈小伟(1967—), 男, 博士, 教授. E-mail: chenxiaoweintu@bit.edu.cn.

complex targets, the influences on shock wave attenuation, energy dissipation, material deformation, crater collapse, and ejecta deposition were summarized. The applicability of existing scaling laws was discussed, and unresolved issues in extending cratering theories to natural impact conditions were identified. These findings show that oblique impacts can generate asymmetric shock pressure fields and energy deposition patterns, affecting transient crater evolution, final crater morphology, and ejecta velocities, directions, and spatial distributions. Surface topography alters local impact geometry and can affect excavation and subsequent crater modification. Porosity promotes energy dissipation through compaction and changes shock wave propagation, while layering and fractures influence stress transmission, material failure, and crater morphology. Together, these factors can produce crater structures and ejecta patterns that depart from predictions based on idealized target conditions. However, their combined effects remain insufficiently quantified, especially across different target types and impact scales. In conclusion, impact crater formation under natural conditions is governed by interactions among impact angle, surface relief, and internal target structure. Current research is constrained by limited multifactor experiments, inconsistent descriptions of target complexity, and uncertainties in extending experimental and numerical results to planetary scales. Future work should integrate systematic experiments, high-resolution three-dimensional simulations, and planetary observations to improve scaling relationships and develop more reliable predictions of crater morphology and ejecta distribution.

Keywords: impact crater; oblique impact; complex target; ejecta; cratering scaling law

参数表

a	弹半径	r	指数
A	斜撞击挖掘流场不对称强度, 式 (20)	r_0	喷射物和流场中心的距离
B_1, B_2, B_3	拟合参数, 式(22)—(27)	R	喷射位置与流场中心的水平距离
C	点源耦合参数 $C = aU^\mu \rho_p^\nu$	R_{sp}	撞击坑半径
c_p, c_t	弹、靶材料声速	S	弹内稀疏波传播速度 图 9
c_L	压缩波传播速度	S_{crit}	缩放强度
D	坑径	U	简单-复杂临界阈值
D_{90°	垂直撞击坑直径	U_V	弹体速度
D_{tr}	瞬态坑直径	U_H	冲击物质法向速度
D_{cx}	撞击坑坡向直径	U_{sp}	冲击物质切向速度
D_{cy}	坑垂直坡向直径	U_{st}	弹内冲击波速度
d	等效爆心深度	u	靶内冲击波速度
d_{max}	无强度最大瞬态空腔深度	$u \square \square$	喷射物速度
E_M	单位质量熔化内能, 式(28)	$u \square$	冲击峰值下的粒子速度
f	摩擦系数	u_v	径向喷射速度
g	重力加速度	u_1, u_2	垂直喷射速度
h	风化层厚度	$u_{jet,i}$	弹、靶相对撞击点速度, 式 (14)
H	坑深	V	射流速度, 式(16)
H_1, H_2	经验常数, 式(26)	V_M	成坑体积
j	经验常数, 式(16)	V_{proj}	熔融体积, 式(28)
K_1	拟合常数, 式(12)	$V_{>p}$	弹体积, 式(28)
K_2	拟合常数, 式(29)	V_θ	压力超过 p 的靶体体积, 式 (29)
K_3	拟合常数, 式(34)	$V_\perp$	θ 角撞击成坑体积
L	弹直径	v	垂直撞击成坑体积
m	弹质量	ω	密度指数, 式(6)
n	挖掘边界系数	x	材料压缩度 $\omega = \rho_s / \rho_0 - 1$
n_s	强度主导的挖掘边界系数	Y	喷射位置和撞击点的距离
n_G	重力主导的挖掘边界系数	Y_i	材料强度
o	孔隙度	Z	靶内聚力强度
P_s	冲击压力	Z_0	流场速度衰减指数
P_s'	归一化压力 $P_s' = P_s / \rho_0 V_i^2$		垂直撞击时的 Z 值
p	压力		
q	近坑缘喷射速度衰减的经验		

π_v	成坑效率 $\pi_v = V \rho_t / m$	β	强度主导的体积缩放指数，式(5) $\beta = 3\mu / 2$
π_2	弗劳德数的倒数 $\pi_2 = ga / U^2$	γ	最大瞬态空腔深度缩放指数，式(31) $\gamma = \mu / (2 + \mu)$
π_3	无量纲强度参数 $\pi_3 = Y_t / (\rho_t U^2)$	θ	撞击角度
π_4	雷诺数的倒数 $\pi_4 = \eta / (\rho_t U a)$	θ_{crit}	形成椭圆形坑的最大撞击角度
	坑直径无量纲数 $\pi_D = D_w (\rho_t / m)^{1/3}$	δ_e	喷射角度
π_D		ϕ	方位角
A	加速度	Φ_f	摩擦角
α	楔角，式(13)	φ_1, φ_2	弹、靶偏转角
η	黏度	φ_c	临界偏转角
$\rho_{\square}, \rho_{\square}$	弹、靶密度	ψ	斜坡倾角
ρ_0	初始材料密度	$\psi_{\square}$	斜坡最大稳定角
ρ_s	材料压缩密度	ζ	滑块与底部之间的有效摩擦系数，式(37)
μ	速度缩放指数，式(6)	$\zeta(t)$	挖掘流的时间相关强度
μ_m	熔融体积缩放指数，式(28)	τ	缩放指数，式(35)
μ_v	体积压力衰减指数，式(29)	χ	归一化曲率（弹靶直径比）
σ	重力主导的体积缩放指数，式(4) $\sigma = 3\mu / (2 + \mu)$	ε	小行星曲率

1 引言

天体撞击是太阳系天体形成与演化过程中普遍发生的重要地质过程，对行星和小天体表面地貌塑造、近表层结构改造、物质迁移以及生命演化均产生了深远影响^[1-6]。撞击坑作为撞击事件最直接、最典型的地质记录，其几何形态、结构特征、喷射物分布和冲击变质特征蕴含着撞击体性质、撞击速度与角度、靶体结构及环境条件等多方面信息，因此长期以来是行星科学、地质学、冲击动力学和高速碰撞物理等领域共同关注的核心问题^[7, 8]。同时，撞击成坑过程和爆炸成坑、弹丸侵彻、高速碰撞以及空间碎片防护等工程问题在冲击波传播、材料破坏、能量沉积和物质抛射等方面具有一定的物理相似性，其研究成果也可用于防护工程、深空探测和小天体防御等应用场景提供理论参考。

早期撞击成坑研究多基于垂直撞击、均质靶体和平坦地形等理想化条件展开。基于这些简化假设，建立了包括 π 群相似律、点源相似律以及实验经验公式在内的一系列经典成坑理论和模型^[7, 9-13]，为揭示撞击坑形成的基本物理过程奠定了重要基础。然而，自然界中的撞击事件往往并不满足上述理想条件。一方面，行星撞击概率表明，斜撞击是自然撞击事件的常态，绝大多数撞击以非垂直角度发生，撞击角度多集中于 30° — 60° 范围^[14]；另一方面，真实行星表面普遍具有复杂地形和非均质地质结构，靶体可能表现出坡度、曲率变化、孔隙结构、分层介质、节理裂隙以及力学性质差异等复杂特征^[14-20]。这些因素会显著改变冲击波传播、能量沉积、物质变形和喷射物运动过程，使实际撞击坑的形态和结构偏离理想模型预测，甚至形成不规则坑缘、非对称喷射物毯、偏移的中央隆起或复杂的坑内构造^[21]。因此，如何将理想条件下建立的成坑理论推广至斜撞击和复杂靶体条件，是当前撞击成坑研究面临的重要科学问题。

在复杂撞击条件中，撞击角度、地形特征和靶体异质性是影响成坑过程的三个关键因素。撞击角度通过改变入射动量和能量在靶体中的空间分配，影响冲击压力、温度场和熔融—气化范围^[22-24]，并进一步控制瞬态坑演化、喷射物初始速度场、喷射物沉积分布以及最终成坑形态^[11, 16, 25-32]。地形特征，尤其是坡度、曲率和局部起伏，会改变撞击接触条件、冲击波传播路径和重力场分布，从而影响坑体尺寸、坑缘发育、喷射物偏向性及坑壁坍塌过程^[17, 18, 21, 33-35]。靶体异质性则主要体现在孔隙度、分层结构、节理裂隙、强度差异和岩性变化等方面^[20, 36-40]。这些因素会影响冲击波衰减、孔隙压实、能量耗散、材料破碎和层间反射/透射过程，进而改变瞬态坑尺度、最终坑形态和喷射物来源深度。更重

要的是,在真实撞击场景中,上述因素通常并非孤立存在,而是相互耦合:斜撞击可能发生于倾斜地形之上,非均质靶体可能同时具有孔隙、分层和节理结构,地形效应也可能放大或削弱撞击角度造成的非对称性。因此,仅讨论单一因素的影响已难以充分解释自然撞击坑的复杂形态和动力学演化过程。

目前,超高速撞击成坑领域已形成较为丰富的理论、实验和数值模拟成果。已有综述大致可分为三类。第一类是经典成坑理论和相似律,包括实验室撞击成坑、 π 群相似律、点源相似律以及实验尺度向行星尺度外推等问题^[11, 12, 41-46]。例如,刘文近等^[41]重点总结了近地小天体撞击成坑模型、实验室撞击成坑经验公式、 π 群相似律和点源相似律等理论及其在理想化撞击条件下的应用;Lv等^[42]进一步补充了成坑不同阶段的主要研究进展和实验室撞击实验进展。上述综述系统总结了撞击成坑领域的理论框架,深化了对撞击成坑过程的认识,但研究对象主要针对垂直撞击、均质和平坦靶体,对斜撞击、复杂地形和靶体非均质结构考虑相对有限。

第二类是行星地质和撞击构造学,重点关注撞击坑形态分类、冲击变质特征、地球物理异常、地球化学效应,以及接触压缩、挖掘和坍塌调整等成坑阶段的地质响应^[47, 48]。例如,Kenkmann等^[47]系统总结了撞击坑形成过程中不同阶段的变形特征,并讨论了斜撞击对冲击压力分布、喷射物不对称性、坑体坍塌及中央隆起的控制作用,其重点主要在撞击构造和地质变形特征,未涉及撞击角度与地形、岩性和靶体异质性之间的耦合作用。

第三类是特定撞击环境或特殊靶体类型,如海洋、小天体、冰质靶、多孔靶和颗粒靶撞击等^[49-54]。例如,Dypvik和Jansa^[49]总结了海洋小天体撞击的沉积特征与沉积过程;Dypvik等^[50]以及Leliwa-Kopystynski和Burchell^[51]分别总结了海洋与冰质环境、冰质与岩质靶体中的撞击成坑问题。张鸿宇等^[53]综述了颗粒靶撞击喷射行为,涉及撞击角度、弹体形状、靶体形貌和材料参数对喷射物运动的影响。该综述关注点在于颗粒靶体的撞击溅射过程,未讨论完整成坑阶段、最终坑形态以及复杂靶体下成坑相似律的扩展。

可见,现有研究仍存在一定的分散性。部分综述侧重于经典相似律及其在理想化条件下的应用,对斜撞击、复杂地形和靶体非均质性的讨论相对有限;部分研究关注撞击构造和地质识别问题,但对撞击角度、地形边界与靶体结构之间的耦合作用缺乏系统梳理;还有一些研究聚焦于海洋、冰层、多孔介质或颗粒靶体等特定环境,尚未充分建立面向复杂自然撞击条件的统一分析框架。特别是对于“斜撞击—复杂地形—非均质靶体”共同作用下的成坑过程,现有研究在冲击波传播、能量沉积、材料破坏、喷射物运动、瞬态坑演化、最终坑形态以及相似律修正之间仍缺少贯通性的综合讨论。

基于此,本文以复杂自然撞击条件下的成坑机制与相似律适用性为主,关注撞击角度、地形特征和靶体异质性等因素的作用,系统梳理其对冲击波传播、能量分配、材料破坏、喷射物运动、瞬态坑演化和最终坑形态的影响。本文重点关注斜撞击与复杂靶体条件下经典成坑模型的适用边界和修正思路,旨在弥补现有综述在多因素影响机制、定量模型归纳和自然撞击情景解释方面的不足,为行星撞击坑识别、小天体撞击灾害评估及高速冲击工程问题提供更贴近实际撞击过程的理论参考。文章主要安排如下:第二节介绍基本的实验设备、数值模拟方法以及连接实验与自然尺度撞击事件的成坑相似律模型;第三节综述正撞击和斜撞击条件下喷射物运动的基本理论及其控制因素;第四节总结斜撞击成坑过程的阶段性演化特征,分析撞击角度对抗体形态、结构非对称性和相似律模型的影响;第五节讨论复杂靶体条件下的成坑机制,包括地形坡度、曲率、孔隙度、分层结构和节理裂隙等因素对冲击波传播、材料破坏和坑体演化的影响,并总结相关修正相似律的发展;最后归纳当前研究中存在的主要问题,并对复杂撞击条件下成坑机制和定量模型的未来研究方向进行展望。需要说明的是,本文讨论对象为行星及小天体表面的广义天体撞击成坑过程,除特指地球陨石样品或特定地球撞击构造外,全文统一使用“撞击体”和“撞击坑”,对于实验则使用弹丸指代撞击体。

2 实验技术、相似律模型和数值方法

天体撞击成坑研究主要采用实验室撞击实验、数值模拟以及天然撞击坑的地质与遥感观测三类研究手段。其中,实验室撞击实验能够在可控条件下揭示撞击速度、撞击角度、弹丸性质和靶体材料等因素对成坑过程的影响,是建立成坑经验公式和相似律模型的重要基础;数值模拟可突破实验室尺度、速度和诊断条件的限制,用于再现天体尺度撞击过程中的冲击波传播、材料破坏、喷射物运动和坑体坍塌等复杂动力学过程;天然撞击坑的地质和遥感观测则为实验和数值模拟结果提供了实际约束,是检验成坑模型及其尺度外推适用性的重要依据。通过实验、模拟与观测的相互结合,并引入 π 群相似律和点源相似律等理论模型,可以对天然行星撞击坑的形成条件和演化过程进行定量分析。

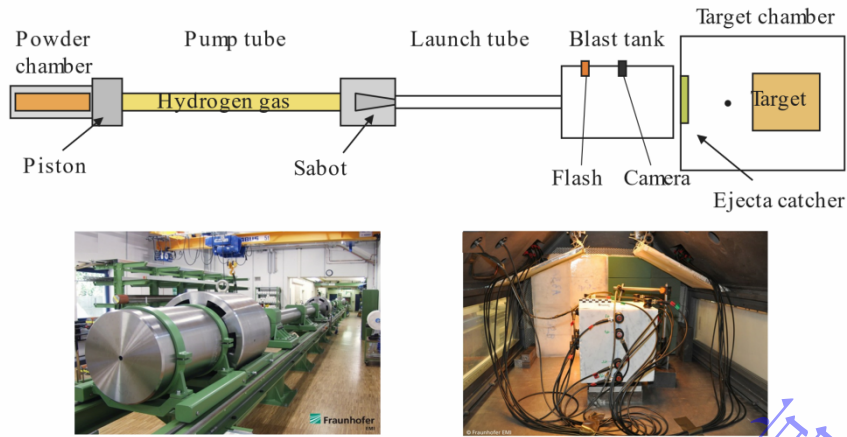
由于Liu等^[41]和Lv等^[42]已对撞击实验设备、经典相似律模型及实验进展进行了系统的综述,本文在此基础上作简要概述。有关行星成坑缩比实验的理论和数值研究还可参见文献^[55]。在介绍实验与理想化模型时,将实验弹丸或模型中的撞击体简称为弹丸,将被撞击的介质称为靶体;经典模型通常采用球形弹丸撞击半无限靶体的近似。行星地质和自然事件的讨论仍使用“撞击体”和“撞击坑”。

2.1 实验条件

实验室撞击实验通常利用高速弹丸撞击固定厚靶,以模拟撞击体撞击行星的基本过程。撞击实验技术通常包括弹丸发射、过程监测和结果分析三个环节。弹丸发射技术的核心是将小质量弹丸加速至高速或超高速状态,常用装置包括二级轻气炮、三级轻气炮、静电粉尘加速器、电热加速器和聚能加速器等。过程监测技术主要包括弹丸测速、高速成像、阴影成像、闪光X射线成像、辐射测量和光谱诊断等,用于记录弹丸入射速度、撞击瞬态过程、喷射物运动以及高温高压辐射特征。垂直弹道靶和离心实验等典型条件及其应用见文献^[56-58]。结果分析则包括撞击坑几何测量、喷射物收集、靶体剖面观测、冲击变质特征识别和残余材料的物理化学检测等。

典型的实验装置包括水平弹道靶^[13]、垂直弹道靶^[56]和土工离心机^[57](图1)。水平弹道靶通常具有较高的弹丸发射速度和较宽的弹丸尺寸适用范围,适合开展超高速撞击、碎片云演化和防护结构响应等研究,但其对重力作用下喷射物回落和坑体后期调整过程的模拟能力相对有限。垂直弹道靶能够更好地模拟重力场中弹丸垂直入射行星表面的成坑过程,便于研究坑体形成、喷射物弹道沉积和坑缘堆积等现象,但通常受到发射速度、弹丸尺寸和靶体装载方式等条件限制。土工离心机通过提高离心加速度模拟不同等效重力环境下的成坑过程和喷射物运动,适合研究重力控制阶段的坑体演化及尺度效应,但其局限性在于弹丸发射速度相对较低,难以完全再现天然撞击事件中的超高速冲击状态。

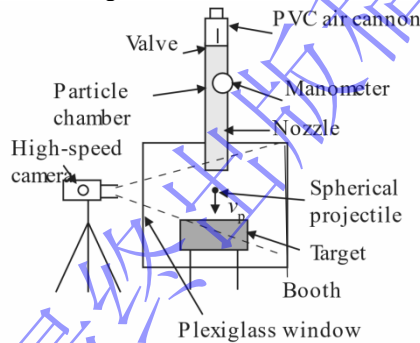
总体来看,现有实验技术仍难以同时满足“大尺寸弹丸”和“超高速撞击”两方面要求。尤其是厘米级及以上弹丸在超过10 km/s速度条件下的稳定发射仍具有较大技术挑战。采用厘米级以上弹丸的意义并不在于其绝对尺度接近天然撞击体,而在于相同超高速条件下更大的弹丸具有更高的动量和能量,形成尺度更大、诊断时空窗口更充分的冲击区和坑体,同时拓展弹丸尺度、速度及相关无量纲参数的实验覆盖范围,从而检验不同尺度下成坑相似律的一致性。进一步将撞击速度提高至10 km/s以上,还可使实验更接近部分天然小天体撞击所对应的强冲击热力学状态,有利于研究高压、相变、熔融和汽化等速度效应。这一参数区间也是聚能加速器、电磁轨道发射和新型超高速加载技术的重要发展方向。需要指出的是,此类实验仍属于缩比实验,不能单独再现天体尺度的重力控制成坑过程,仍需与相似律、离心实验和数值模拟结合进行尺度外推。此外,超高速撞击过程通常伴随极端高温、高压、相变、熔融汽化和电离等复杂物理现象,传统的事后测量手段难以完整捕捉撞击瞬态过程。因此,未来实验研究还需进一步发展多光谱成像、瞬态光谱诊断、闪光X射线成像、同步辐射X射线衍射和高时间精度温度/压力测量等原位诊断技术,以提高对冲击波传播、材料相变、喷射物形成和成坑动力学过程的定量认识。



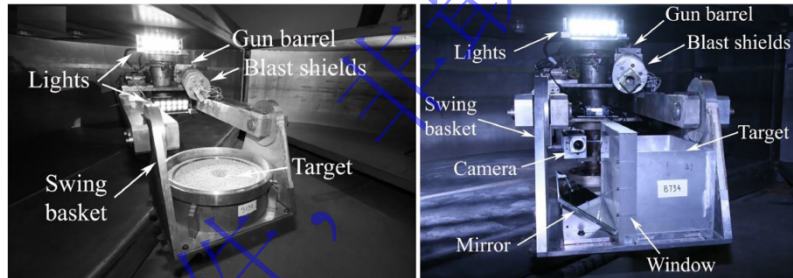
(a) Horizontal ballistic range [13]



(b) AMS vertical ballistic range [56]



(c) Vertical gas gun [58]



(d) Boeing 600g geotechnical centrifuge [57]

图 1 常规实验设备
Fig. 1 Conventional experimental apparatus

2.2 成坑相似律模型

成坑相似律是撞击成坑研究中描述坑体特性与初始撞击条件之间的函数关系，用于连接实验室实验与天体尺度撞击事件。需要指出的是，经典成坑相似律主要是在垂直撞击、均质靶体和平坦靶面等理想条件下建立的，通常未显式包含撞击角度、复杂地形和靶体异质性等因素。因此，在自然撞击事件中，若要将经典相似律推广至斜撞击和复杂靶体条件，需要进一步引入撞击角度、有效速度分量、摩擦特性、孔隙度、地形坡度和分层结构等修正参数。

成坑相似律的基本思想是通过量纲分析构建无量纲参数组，将坑径 D 、坑深 H 、成坑体积 V 等成坑特征，与弹半径 a 、撞击速度 U 、弹/靶密度 ρ_p 和 ρ_t 、重力加速度 g 、靶材料强度 Y 、弹/靶材料声速 c_p 和 c_t 、黏度 η 等初始参数联系起来，从而建立可用于尺度外推的定量关系，即 π 群相似律。一般成坑体积函数关系可表示为^[11, 12, 45, 59-61]：

$$V = f \{a, U, \rho_p, g, \rho_t, Y, c_p, c_t, \eta\} \quad (1)$$

以靶体密度 ρ_t 、撞击速度 U 和弹半径 a 作为基本量进行无量纲化，公式 (1) 可简化为^[41]：

$$\frac{V\rho_t}{m} = f\left\{\frac{ga}{U^2}, \frac{\rho_p}{\rho_t}, \frac{Y}{\rho_t U^2}, \frac{c_p}{c_t}, \frac{\eta}{\rho_t Ua}\right\} \quad (2)$$

其中, 弹质量 $m=(4\pi\rho_p a^3)/3$ 。在给定弹靶材料组合下, 弹靶初始密度比和声速比可近似视为常数, 因此式 (2) 可进一步简化为:

$$\frac{V\rho_t}{m} = f\left\{\frac{ga}{U^2}, \frac{Y}{\rho_t U^2}, \frac{\eta}{\rho_t Ua}\right\} \quad (3)$$

式 (3) 左侧为无量纲成坑效率, 通常用于表征单位弹丸尺度或单位弹丸质量所对应的成坑能力, 记为 $\pi_v = V\rho_t/m$; 右侧第一项为重力项, 反映重力作用与惯性作用的相对大小, 为弗劳德数的倒数, 记为 $\pi_2 = ga/U^2$; 第二项为强度项, 表示靶体材料强度与撞击动能之比, 为柯西数, 记为 $\pi_3 = Y/(\rho_t U^2)$; 第三项为黏性项, 可理解为雷诺数的倒数, 用于表征黏性效应与惯性效应的相对大小, 记为 $\pi_4 = \eta/(\rho_t Ua)$ 。对于大多数固体或颗粒靶体撞击实验, 黏性效应通常不是主要控制因素, 因此该项常被忽略。由此可见, 在经典 π 群相似律框架下, 成坑结果主要受重力项和强度项控制。

根据重力和材料强度在成坑过程中的相对重要性, 撞击成坑通常可分为重力控制和强度控制两种。对于大型行星撞击坑或弱强度靶体, 重力作用超过材料强度而发生大规模坍塌形成复杂坑, 成坑相似律可表示为:

$$\frac{V\rho_t}{m} \propto \left(\frac{ga}{U^2}\right)^{-\sigma} \quad (4)$$

其中, σ 为重力主导的体积缩放指数。对于小尺度撞击坑、强靶体或低重力环境下的成坑过程, 材料强度为主导因素, 无量纲形式表现为:

$$\frac{V\rho_t}{m} \propto \left(\frac{Y}{\rho_p U^2}\right)^{-\beta} \quad (5)$$

其中, β 为强度主导的体积缩放指数。 σ 与 β 因靶材 (干砂、水、金属、冲积土) 不同而变化^[11, 62]。上述重力控制和强度控制模型为实验室撞击成坑数据整理和天然撞击坑尺度预测提供了基本框架, 但早期研究常将撞击体动能或动量作为单一标度量, 不同靶材条件下的拟合结果存在差异, 成坑标度律背后的物理机制也尚未完全统一。

为解决长期以来成坑标度律中长期存在的能量缩放与动量缩放争议, Holsapple 和 Schmidt^[7] 提出了点源近似理论和耦合参数概念。点源近似认为, 撞击体向靶体传递能量和动量的过程主要发生在与撞击体半径相当的局部区域, 而坑体扩张、喷射物流动和瞬态坑形成等主要成坑现象发生在远大于撞击体尺度的区域。因此, 在远场成坑过程中, 撞击体的尺寸、形状和部分材料细节可被等效为一个点源, 其对靶体的作用可由耦合参数 C 表征:

$$C = aU^\mu \rho_p^\nu \quad (6)$$

其中, μ 为速度缩放指数, 反映靶体材料在高压冲击条件下的响应特征, 其取值介于 1/3 (动量缩放) 和 2/3 (能量缩放) 之间 (干燥土壤 $\mu \approx 0.41$, 无孔材料 $\mu \approx 0.55$)。密度指数 ν 反映弹密度对成坑效率的影响, 多数材料约为 0.4。将耦合参数 C (式 (6)) 代替式 (1) 中的 a 、 U 和 ρ_p 后, 可得到基于点源近似的成坑关系:

$$V = f\{aU^\mu \rho_p^\nu, g, \rho_t, Y\} \quad (7)$$

通过无量纲化处理可以得到^[57]:

$$\pi_v \pi_2^{\frac{3\mu}{2+\mu}} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{\frac{2+\mu-6\nu}{2+\mu}} = f\left[\pi_2 \left(\frac{Y}{\rho_t U^2}\right)^{-\frac{2+\mu}{2}} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^\nu\right] \quad (8)$$

在重力主导的极限情况下, 材料强度项可以省略, 得到无量纲形式:

$$\pi_v = \pi_2^{-\frac{3\mu}{2+\mu}} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{\frac{6v-2-\mu}{2+\mu}} \quad (9)$$

当强度主导时，无量纲表达式为：

$$\pi_v = \left(\frac{Y}{\rho_t U^2} \right)^{\frac{3\mu}{2}} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{3v-1} \quad (10)$$

以缩放指数 μ 为核心，可以推导出不同成坑阶段和不同靶材条件下的关键标度关系。成坑体积相似律（公式（4）、（5））中的幂律指数 σ 、 β 等均可与 μ 建立代数关系^[7]：

$$\begin{cases} \sigma = 3\mu / (2 + \mu) \\ \beta = 3\mu / 2 \end{cases} \quad (11)$$

除成坑体积外，坑径和坑深也可采用类似方法进行尺度化处理。例如，瞬态坑直径 D_{tr} 的无量纲表达式可写为 $D_{tr} = f \{a, U, \rho_p, g, \rho_t, Y, c_p, c_t, \eta\}$ ，结合耦合参数得到撞击坑直径的无量纲度量

$\pi_D = D_{tr} (\rho_t / m)^{1/3}$ 与其他变量之间的函数关系^[45]：

$$\pi_D = K_1 \left[\pi_2 \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{-\frac{\mu+2-6v}{3\mu}} + \left(\pi_3 \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{-\frac{2-6v}{3\mu}} \right)^{\frac{\mu+2}{2}} \right]^{\frac{-K}{\mu+2}} \quad (12)$$

其中， K_1 为与靶体材料和实验条件相关的拟合常数。点源近似理论和 π 群量纲分析共同构成了现代撞击成坑相似律的理论基础，其耦合参数和缩放关系已被广泛应用于实验室撞击成坑、天然撞击坑尺度估算和小天体撞击效应评估等研究中。

然而，经典成坑相似律仍具有一定局限。首先，模型参数通常需要依赖实验拟合，如 (μ, K_1) ，且不同靶材和实验条件下参数取值并不完全一致。其次，该类模型主要描述成坑结果与初始参数之间的整体缩放关系，难以直接体现冲击衰减、热力学耗散的物理细节。为提高成坑预测的物理解释能力，Kurosawa 和 Takada^[63] 基于 Maxwell Z 模型^[9] 和残余速度理论^[64] 提出了完全解析方法，用于预测喷射速度和瞬态坑空腔半径等撞击结果。该方法在一定程度上加强了成坑流场与坑体尺度之间的理论联系，但仍存在忽略内摩擦和应变局部化效应、强度模型更适用于金属类靶材、低速撞击条件下预测偏差较大等局限。

总体而言，成坑相似律模型为撞击成坑研究提供了统一的无量纲描述框架，但其主要建立在垂直撞击、均质靶体和平坦靶面等理想条件下。实际天体撞击事件通常伴随斜撞击、低重力、高孔隙度、复杂地形、分层结构和节理裂隙等因素，使冲击波传播、能量沉积、材料破坏、喷射物运动和坑体坍塌过程偏离经典模型预测。因此，将经典相似律推广至自然撞击条件时，需要进一步引入撞击角度、摩擦角、孔隙度、地形坡度、层厚比和结构面方向等修正参数。其中，撞击角度对成坑形态参数和角度修正相似律的影响将在第 4.4 节中讨论，复杂靶体结构对相似律适用性的影响将在第 5 节中展开。

2.3 数值模拟方法

实验室撞击实验能够在可控条件下揭示成坑过程，但受实验成本、操作复杂性、参数覆盖范围和原位诊断能力限制。尤其是行星撞击中常见的熔融、气化、大尺度喷射物运动和坑体坍塌等过程，难以在实验中完整重现。数值模拟能够突破实验尺度和观测手段的限制，直接获得压力、温度、速度、密度和损伤等演化信息，因此已成为研究撞击体撞击成坑机制的重要方法。

撞击体撞击模拟通常分别为二维和三维模拟。二维模拟适用于轴对称垂直撞击，计算效率较高，能够在较高分辨率下分析冲击波传播、喷射物运动和坑形发展；三维模拟则适用于非轴对称问题，如斜撞击、非均质靶体、复杂地形和不规则撞击体等。由于三维模拟对计算资源和内存需求较高，其应

用长期受到限制,但随着高性能计算的发展,三维数值模拟在复杂撞击条件研究中正发挥越来越重要的作用。

常见的数值模拟方法主要包括网格法和无网格法。网格法包括欧拉(Euler)法和拉格朗日(Lagrange)法。欧拉法采用固定空间网格描述材料运动,适合处理大变形、强冲击和多材料流体运动问题,并可通过“混合单元”处理不同材料共存的情况。但材料界面容易发生数值扩散,界面识别精度依赖网格分辨率;网格越细,材料边界越清晰,但计算量也显著增加。基于欧拉方法的典型程序包括 Sandia 实验室开发的 2D CSQ、2D/3D CTH,以及俄罗斯开发的 2D/3D SOVA 等。

拉格朗日法则使计算网格随材料一起运动,因此材料边界清晰,守恒方程处理相对直接,适合描述固体材料变形和界面运动。但在超高速撞击产生的大变形条件下,拉格朗日网格容易发生严重畸变,甚至出现负体积等数值问题。为解决这一问题,需要重新划分计算网格,将一个新的、未扭曲的网格覆盖在旧的、扭曲的网格上。这个过程将会增加计算复杂性,并可能引入数值耗散。而且单元删除导致系统能量损失,无法充分展示撞击过程和撞击后的现象。

任意拉格朗日-欧拉法(impact simplified arbitrary Lagrangian Eulerian, iSALE)结合了欧拉方法和拉格朗日方法的特点,通过引入可独立运动的参考网格,在一定程度上兼顾材料界面追踪和大变形处理能力。当前行星撞击成坑研究中广泛使用的冲击-简化任意拉格朗日-欧拉(impact-Simplified Arbitrary Lagrangian Euler, iSALE)^[65]程序即属于冲击物理领域的重要 ALE 类程序。iSALE 能够处理多材料状态方程、强度模型、损伤模型、孔隙压实模型和重力坍塌调整过程,并提供二维和三维模拟条件,因此被广泛应用于简单坑、复杂坑、多孔靶体、分层靶体和斜撞击成坑研究。不过,对于强烈破碎、离散喷射物运动和层裂细节,iSALE 的模拟结果仍受网格分辨率和材料界面处理方式影响。

无网格法中具有代表性的是光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)法。SPH 方法不依赖固定网格,而是利用粒子描述材料运动,因此不存在传统网格畸变问题,适合模拟大变形、碎裂、喷射物离散运动和行星尺度撞击过程^[30, 66-69]。其守恒方程是常微分方程组,便于描述材料的高速抛射和碎片化过程。但 SPH 方法也存在一定局限,例如材料边界不够清晰、粒子分辨率对结果影响显著、本构模型和强度模型实现相对复杂等。Kurosawa et al.^[70]对比了 iSALE 和 SPH 方法在不同分辨率(cells per projectile radius, CPPR)下模拟高速撞击后喷射物运动的结果,如图 2 所示。尽管两种方法的分辨率与维度不同,其得到的抛射物空间分布、速度范围及层裂机制结论具有较好一致性,说明二者均可用于研究撞击喷射物动力学过程。但在低分辨率下,iSALE 对喷射物完整形态和靶体破碎程度的呈现能力相对有限。

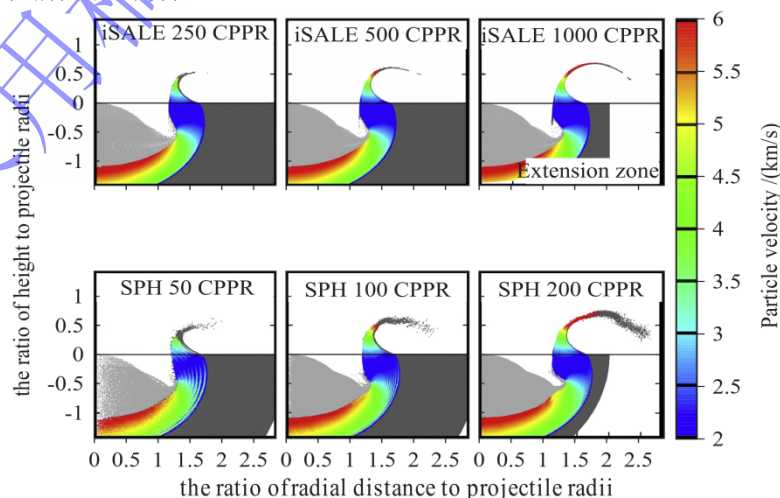


图 2 iSALE 和 SPH 方法在不同 CPPR 下的喷射现象^[70]

Fig. 2 Snapshots of the hydrocode calculation results from the iSALE and SPH codes with different CPPR^[70]

近年来,研究者进一步将有限元方法与 SPH 方法结合,发展了有限元-光滑粒子流体动力学 (finite element - smoothed particle hydrodynamics, FE-SPH) 自适应方法。该方法在计算过程中将达到失效阈值的单元转化为 SPH 粒子继续参与运算,避免了单元删除造成的系统能量损失,并使转化后的 SPH 粒子与剩余有限单元共同描述撞击后的材料破碎、喷射和回落过程。FE-SPH 自适应方法已在超高速撞击领域得到广泛应用^[71-75]。Lv et al.^[73] 在二维条件下使用 FE-SPH 方法模拟了不同规模的垂直撞击事件,较好地揭示了成坑过程中的应力波传播以及材料压力、温度、密度和损伤演化等细节。与 iSALE 模拟结果对比发现,FE-SPH 方法在较低 CPPR 分辨率(弹半径长度与单元尺寸之比)下即可获得与 iSALE 较高分辨率相当的模拟效果,并能较完整地呈现物质流动、喷射物降落分层现象以及岩石破碎区与未破碎区之间的边界。Ma et al.^[24] 进一步通过三维 FE-SPH 方法研究斜撞击成坑过程,并与二维 iSALE 模拟结果进行对比,如图 3 所示。

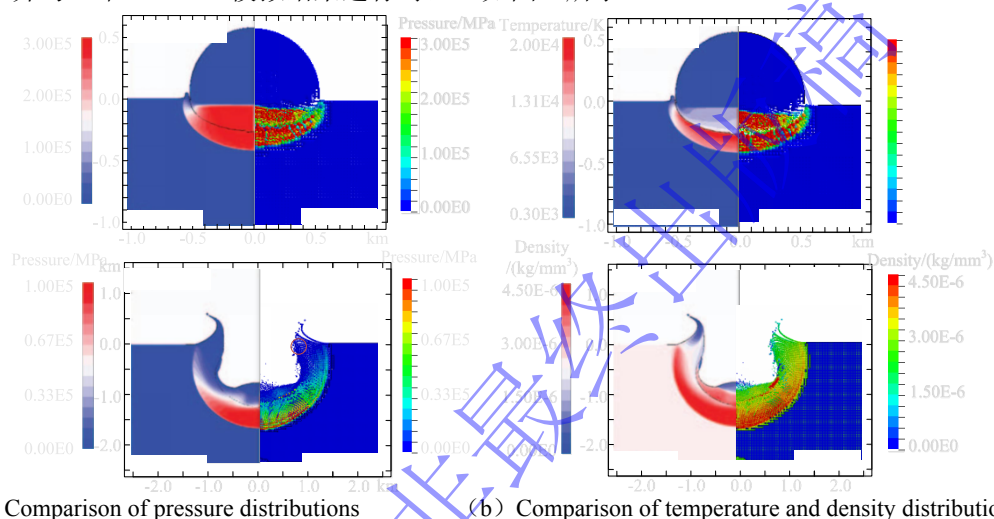


图 3 iSALE-2D^[76]和三维 FE-SPH 自适应耦合方法的计算结果对比^[24]
Fig. 3 Comparison of calculation results obtained by iSALE-2D^[76] and the 3D FE-SPH adaptive coupling method^[24]

结果表明,FE-SPH 自适应方法不仅能准确模拟冲击压力、温度、密度分布以及初始撞击凹陷形态发展,还能够更细致地展现喷射物细节。喷射物以粒子形式运动,粒子之间的相互作用可在一定程度上模拟破碎岩石之间的碰撞;坑内壁可观察到由破碎弹丸和靶体组成的离散粒子下落;同时,该方法还可用于模拟靶体层裂现象。相比之下,iSALE 模拟的撞击形态通常较为连续和理想化,对喷射物离散运动、岩石破碎分离以及层裂等细节的展现能力相对有限。

总体来看,不同数值方法各有适用范围。二维模拟适合垂直撞击和参数敏感性分析,三维模拟适合斜撞击、复杂地形和靶体横向非均质性问题;欧拉方法和 ALE 方法适合强冲击、大变形和多材料流动过程,SPH 和 FE-SPH 方法更适合描述碎裂、喷射物离散运动和层裂等细节过程。在实际研究中,模型选择应根据研究对象、尺度范围、撞击角度、靶体结构和关注的物理过程综合确定。

数值模拟和实验室实验在撞击成坑研究中具有互补关系。实验室实验能够为数值模型提供验证数据,数值模拟则可在实验难以覆盖的参数范围内扩展研究边界,并为实验设计提供指导。此外,月球勘测轨道器、火星侦察轨道器等探测任务获取了大量高分辨率撞击坑数据,为理论模型和数值模拟结果的验证提供了重要观测基础^[77]。实验室实验、数值模拟和行星观测的结合,共同推动了撞击成坑动力学模型的发展。其中,喷射物运动模型是连接冲击波传播、瞬态坑形成和最终喷射沉积的重要理论基础。下一节将重点综述正撞击和斜撞击条件下喷射物运动的基本理论。

3 喷射物运动基本理论

撞击体超高速撞击过程中会产生大量喷射物,其速度、质量、喷射角度和沉积分布记录了撞击能

量沉积、冲击波传播和挖掘流场等关键信息，是理解撞击侵蚀/增生效应、风化层形成、小天体物质逃逸以及撞击参数反演的重要依据。因此，在讨论撞击角度和复杂靶体对成坑过程的影响之前，有必要对喷射物运动的基本理论进行梳理。

喷射物并非由单一机制产生，而是对应于成坑的不同阶段。Kurosawa et al. [70]根据喷射时间、位置 and 速度将垂直撞击下的喷射物运动分为射流[78, 79]、层裂[70, 80, 81]和正交挖掘[9, 16, 31, 63, 82]三类，如图 4 所示。其中，射流主要产生于接触压缩阶段，层裂喷射发生于接触压缩阶段末期至挖掘阶段初期，挖掘喷射则主要发生于挖掘阶段。撞击角度 θ （定义为撞击体撞击方向与靶体表面的夹角）主要通过改变早期冲击压力场、动量沉积方向和残余速度场，影响喷射物的来源、速度、角度和方位分布[6, 10, 79, 83, 84]。Okamoto et al. [66] 结合超高速成像实验和 SPH 模拟发现， 45° 斜撞击下的喷射物具有“双组分”结构，如图 5 所示：组分 1 向下行方向反溅，速度可高于撞击速度；组分 2 在撞击点上方扩散并向下行方向移动，两者之间形成组结。该结果表明，斜撞击会显著改变早期高速喷射物的来源、速度和运动方向。

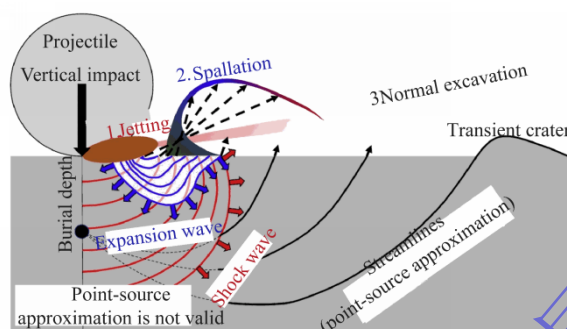


图 4 喷射物运动分析模型[70]

Fig. 4 Analytical model for ejecta motion [70]

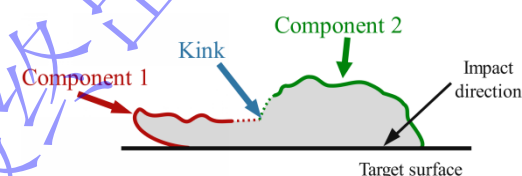


图 5 斜撞击喷射物结构[66]

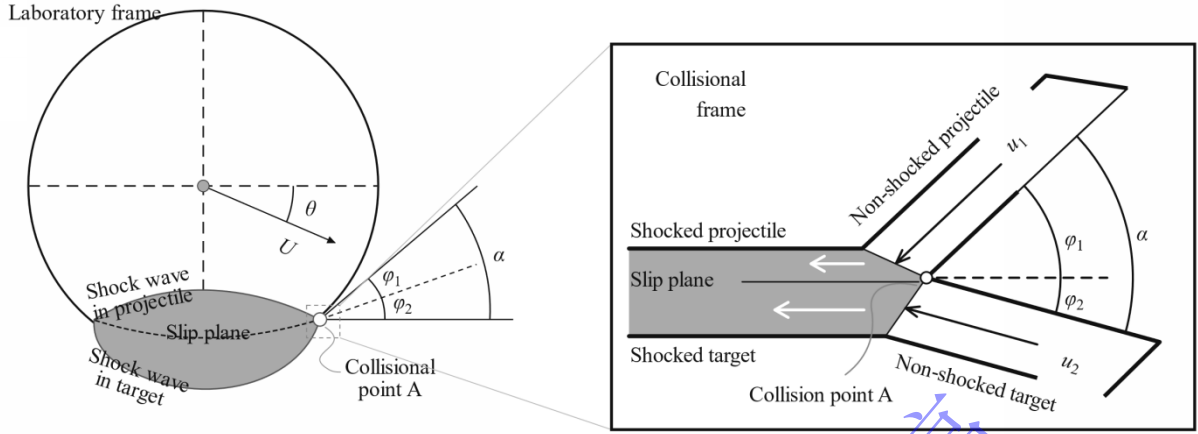
Fig. 5 Ejection structure under oblique impact [66]

基于上述认识，本节首先介绍接触压缩阶段中射流的形成条件和运动模型；其次讨论低角度斜撞击下的擦射喷射以及自由面反射导致的层裂喷射机制；最后综述挖掘阶段的挖掘流运动机理和模型等理论。喷射物为射流、层裂和挖掘喷射物的统称。

3.1 接触压缩阶段的射流模型

接触压缩阶段初期，靶体和弹在接触区发生强烈相互作用，局部材料在极高压力和温度作用下被压缩并沿接触界面高速挤出，形成射流[85, 86]。射流是撞击早期能量释放和物质迁移的重要表现形式，也被认为与月球玻璃陨石、某些球粒陨石及火星陨石的形成过程密切相关[79, 87, 88]。

早期射流理论主要源于金属薄板斜碰撞实验。Walsh et al. [89]基于 Rankine-Hugoniot 关系与流体力学边界条件，推导了射流形成的临界条件：当两碰撞面之间的楔角超过某一临界值时，流动由规则反射状态转变为不规则状态，材料无法仅通过单一斜激波完成偏转，压力释放转通过高速物质喷射实现，从而形成射流。然而，该模型主要适用于对称平板碰撞场景，难以直接描述行星撞击中常见的球形弹丸撞击半无限靶体问题。随后，Melosh 和 Sonnett [83]、Vickery [90]、Ang [78] 等将其逐步拓展至球形弹丸撞击半无限靶体问题，用于描述射流起始时间、射流速度以及射流来源等问题。Sugita 和 Schultz [91] 进一步考虑撞击角度和弹靶冲击阻抗的影响，对平板碰撞射流模型进行修正，如图 6 所示，并指出黏性剪切加热等因素可能对射流温度和相态产生重要影响。其中， θ 为撞击角度（速度方向和水平方向的夹角）， α 指弹靶下行方向接触点处的楔角， φ_1 和 φ_2 分别为接触点处弹、靶与接触面的夹角，称为偏转角。



(a) Laboratory coordinate system: a spherical projectile impacts the stationary target at velocity U and angle θ

(b) Impact-point coordinate system: propagation velocities of shock waves and particles relative to the impact point

图 6 斜撞击射流模型^[85]

Fig. 6 Jet model for oblique impact^[85]

由图 6 所示，球形弹丸斜撞击靶体时，弹靶接触点处的楔角 α 随时间变化，可表示为：

$$\alpha(t) = \arccos\left(\frac{a - Ut \sin \theta}{a}\right) \quad (13)$$

式中， a 为弹半径， U 为撞击速度， θ 为撞击角度， t 为球形弹与靶体初始接触后的时间，楔角 α 为两侧偏转角 φ_1 和 φ_2 之和。图 6 (b) 给出了固定在碰撞点附近的局部坐标系，在该坐标系中，弹丸和靶体相对于碰撞点的有效速度分别为 u_1 和 u_2 ，其计算公式为^[78, 91]：

$$\begin{cases} u_1 = \frac{U \sin \theta}{\sin \alpha(t)} \\ u_2 = \frac{U \sin \theta}{\tan \alpha(t)} + U \cos \theta \end{cases} \quad (14)$$

当碰撞界面的偏转角超过临界偏转角 φ_c 时，形成射流。Walsh et al.^[89] 提出可通过滑移面法和图解法确定射流临界条件。滑移面法将弹靶接触界面视为滑移面，忽略界面处黏性剪切应力，仅要求两侧压力相等且法向速度连续。结合 Rankine-Hugoniot 关系和冲击压力边界条件，可迭代求得两侧偏转角 φ_1 和 φ_2 ：

$$\cos^2 \varphi_i = \frac{1 - P'_s}{1 - \frac{\omega + 2}{\omega + 1} P'_s} \quad (15)$$

式中，归一化压力 $P'_s = P_s / \rho_0 u_i^2$ (P_s 为冲击压力， $i=1, 2$ 分别为弹、靶的有效速度)，由状态方程计算得到；材料压缩度 $\omega = \rho_s / \rho_0 - 1$ ，其中 ρ_s 为压缩密度， ρ_0 为初始密度。

其次，利用图解法确定临界偏转角 φ_c 。如图 7 所示，对于给定初始状态，通过 Rankine-Hugoniot 方程推导受冲击物质水平速度分量 U_H 和垂直速度分量 U_V 的关系，并在 U_H - U_V 平面上绘制所有可能冲击状态所构成的冲击极线。当偏转角较小时，冲击极线与允许偏转线存在交点，材料可通过规则斜激波完成偏转 (Regular Regime)；当偏转角增大至临界值时，允许偏转线与冲击极线相切，单一斜激波已无法满足偏转要求，此时流动进入不规则状态 (Irregular Regime) 并形成射流。

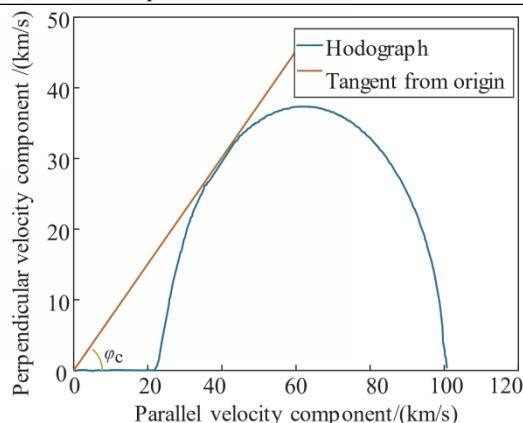


图 7 图解法计算临界偏转角^[92]

Fig. 7 Graphical method for calculating the critical deflection angle^[92]

在实验室坐标系中，受冲击弹丸和靶体产生的射流速度 $u_{\text{jet},1}$ 和 $u_{\text{jet},2}$ 可通过弹、靶相对撞击点的有效速度 u_1 和 u_2 计算^[89]：

$$u_{\text{jet},i} = ju_i \cos \varphi_2 + u_2 \quad (i = 1 \text{ for projectile, and } i = 2 \text{ for target}) \quad (16)$$

式中， j 为经验常数，表示有效冲击速度与碰撞坐标系下射流速度的比值，通常取值为 1^[89]。 $ju_i \cos \varphi_2$ 表示撞击点坐标系中，射流形成后沿弹靶接触面方向运动的速度分量； u_2 为撞击点相对靶面运动速度，此处表示从撞击点坐标系转换到实验室坐标系的平移速度。

近年来，数值模拟和高速成像实验进一步拓展了射流理论。Johnson et al.^[79] 利用 iSALE-2D 模拟球形弹丸垂直撞击过程，量化了靶体曲率和撞击速度对射流质量的影响。Kurosawa et al.^[85] 通过超高速成像实验直接观测球形弹丸斜撞击下的射流过程，验证了小撞击角条件下射流的不连续分布特征。Wakita et al.^[86] 利用 iSALE-3D 模拟橄榄岩弹丸斜撞击橄榄岩靶体过程，发现撞击角低于 45° 时射流主要来源于弹丸，而撞击角超过 75° 时射流以靶体材料为主。Sugandhi 和 Agarwal^[92, 94] 进一步指出，射流起始时间和速度受撞击速度、撞击角度、冲击阻抗和 Hugoniot 参数共同控制，射流速度通常在中等撞击角范围内达到较高值。

总体来看，现有射流研究仍存在一定不足：实验材料类型有限，对多孔材料、复合材料和非均质靶体的适用性仍需拓展；非对称射流的微观结构、物相变化和冲击变质特征尚缺乏系统研究；早期高速射流的模拟对空间分辨率要求较高，射流质量和温度的定量验证仍不足。Ma et al.^[24] 利用 FE-SPH 自适应方法分析了斜撞击下的初始喷射现象，阐明了撞击角度对射流顺序、物质来源和温度分布的影响，并从射流顺序角度解释了喷射物中冲击变质产物分层分布的形成原因。

3.2 擦射和层裂

接触压缩阶段末期和挖掘阶段初期还可能出现弹丸擦射^[26, 32]和靶体层裂^[70]喷射等现象。其中，擦射主要为低角度斜撞击下弹丸动量沿靶面方向的强烈保留，而层裂喷射则主要由冲击波与自由面反射稀疏波相互作用引起，二者发生阶段相近，但形成机制不同。

Elbeshausen et al.^[32] 将低角度斜撞击下的弹丸作用机制分为三类，如图 8 所示。（1）过渡机制（ $\theta=20^\circ$ ），喷射幕平行于表面，弹体全部破碎；（2）弹跳机制（ $\theta=10^\circ$ ），弹浅度穿透目标，近表面物质受动量驱动位移，形成下游次级结构，有超过 90% 的弹材料受到超过雨贡纽弹性极限（Hugoniot elastic limit, HEL）的冲击压力^[32, 95]；（3）掠射机制（ $\theta=5^\circ$ ），弹几乎平行于表面运动，仅少量能量传递给目标，仅有一小部分弹受到超过 HEL 的冲击，弹体可能发生断裂甚至斩断^[15, 26, 32, 96-98]。Ma et al.^[24] 进一步将坑外保留较大水平速度并近似沿靶面方向运动的弹丸喷射物定义为擦射喷射物，并提出了擦射喷射发生的临界角度计算方法，如图 9 所示。该研究为解释极低角度撞击中弹丸物质远距离迁移和沟槽状坑形成提供了新的思路，但目前模型仍未充分考虑靶体孔隙度、弹丸形状、

348 拉伸破坏和剪切破坏等因素的影响。

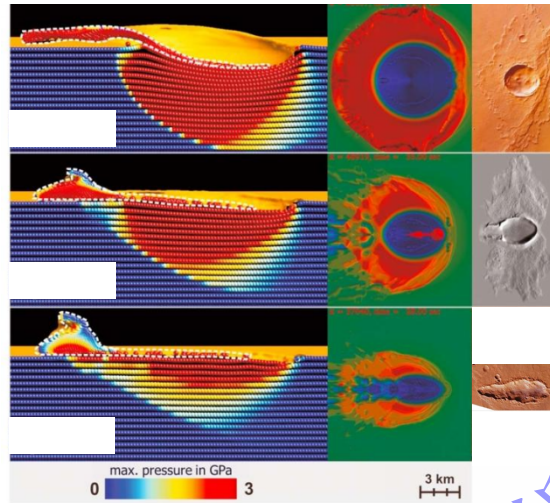


图 8 弹丸在低撞击角度下的不同作用机制^[32]
Fig. 8 Distinct acting mechanisms of projectiles at low impact angles^[32]

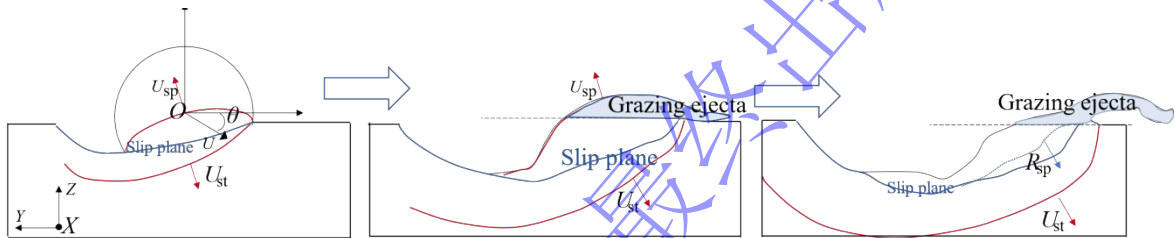
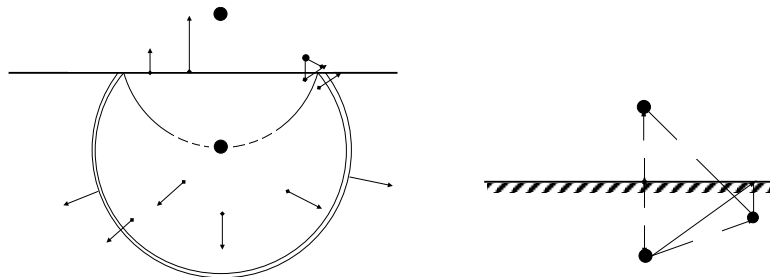


图 9 弹丸擦射机理^[24]
Fig. 9 Grazing mechanism of projectile^[24]

353
354
355
356
357 层裂喷射是由自由面反射诱发的近表面拉伸破坏过程。其本质是冲击波传播至靶体自由面后反射
358 形成稀疏波，稀疏波叠加使近表面物质发生拉伸断裂，形成轻冲击、高速度的层裂喷射物。因此被认
359 为是行星间物质交换和陨石起源的重要机制之一。层裂提高了撞击坑的成坑直径和体积，导致撞击坑
360 直径远大于深度^[99]。

361 Melosh^[81] 首次建立了撞击层裂解析模型（图 10）。该模型将撞击产生的应力脉冲近似为从埋深
362 d 处向外传播的三角形压缩波（波速为 c_L ），并利用自由面零压力边界条件，将反射稀疏波等效为来
363 自镜像源的拉伸脉冲。镜像源位于埋藏深度上方 $2d$ 处（图 10（b））。目标体中某一点的压缩—减压
364 历史可由入射压缩波和反射稀疏波线性叠加表示。若反射稀疏波在压缩波达到峰值之前追上压缩波，
365 则该点可能进入拉伸状态并触发层裂。近表面材料粒子速度起初从等效爆心沿径向向外，在稀疏波的
366 速度增量作用下，其合成喷射速度 u 几乎垂直向上。该模型为层裂喷射质量和速度提供了简明的解析
367 描述，但难以处理撞击点附近的复杂非线性波相互作用，也难以反映真实地质材料的损伤演化和非均
368 质响应。



(a) The compressive wave propagates from the equivalent explosion center, and the particle velocity behind the wave is u_{ph}

(b) Schematic geometry of the equivalent mirror explosion center

图 10 应力波传播模型^[81]

Fig. 10 Stress wave propagation model^[81]

高分辨率数值模拟进一步揭示了层裂喷射的后期加速机制。近年来，研究重点转向近表面应力波的非均匀相互作用。Melosh et al.^[80]指出，垂直撞击中冲击波边缘会形成不规则反射区（irregular reflection wedge），即由自由面稀疏波向下穿入已受冲击材料所形成的近三角形低压区域，此区域主要发生层裂和压缩碎裂。传统层裂模型预测喷射速度上限约为 $2u_{ph}$ ，其中 u_{ph} 为峰值冲击状态下的粒子速度^[81]。Kurosawa et al.^[70] 进一步发现，由于激波传播过程中的衰减效应，近表面不同初始位置的物质具有不同的质点速度，导致喷出帘根部发生物质堆积和持续压缩，形成压力梯度并驱动近表层材料在激波卸载后进一步加速。对于激波与卸载波传播方向近似垂直的情况，卸载后的质点速度约为 $\sqrt{2}u_{ph}$ ；在上述附加加速作用下，部分喷出物的最终抛射速度甚至超过 $\sqrt{2}u_{ph}$ （图 11）。这一机制解释了轻度冲击能够形成高速喷射物的原因。需要注意的是，该过程对网格分辨率和人工黏性较为敏感，准确捕捉近表面压力场通常需要极高的计算分辨率。

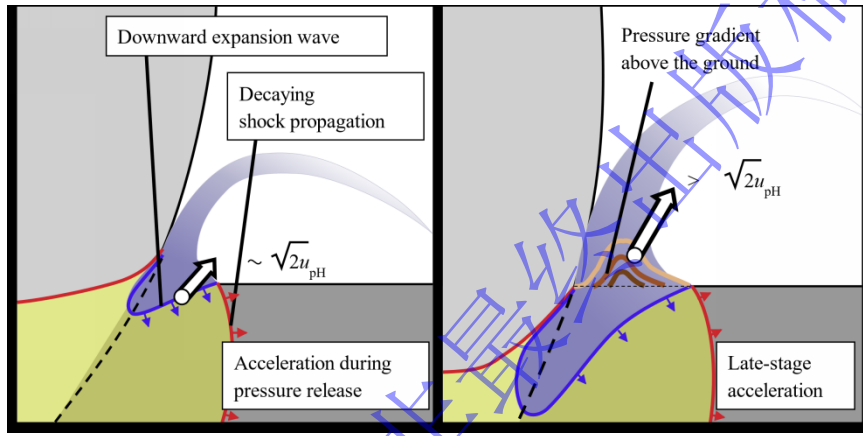


图 11 层裂形成示意图^[70]

Fig. 11 Schematic diagram of spallation formation^[70]

3.3 挖掘阶段的喷射模型

进入挖掘阶段后，靶体近表面材料从空腔中心向边缘逐渐发射，形成主体挖掘喷射物。与接触压缩阶段的射流和层裂喷射不同，挖掘喷射主要受冲击残余速度场、压力梯度和材料流场控制，其速度、角度和质量分布直接决定喷射幕形态、喷射毯沉积范围和瞬态坑扩展过程。

Maxwell^[9] 提出用于描述爆炸成坑挖掘流场的 Z 模型，如图 12（a）所示。该模型假设地下物质流动为不可压缩流，物质脱离靶体后沿独立弹道轨迹运动，且径向喷射速度 u_h 随距流场中心距离增加而衰减，其表达式为：

$$u_h = \zeta(t) / r^Z \quad (17)$$

其中， $\zeta(t)$ 为挖掘流场的时间相关强度， r 为喷射物到流场中心的距离， Z 为流场速度衰减指数，用于描述靶体内部质点径向速度随距离的衰减速率。 Z 是该模型的核心参数，决定流线形态、挖掘深度和喷射角度。喷射角度 δ_e 可表示为^[9]：

$$\tan \delta_e = Z - 2 \quad (18)$$

通过流线方程和动量守恒可以推导出成坑半径与能量释放、重力加速度的函数关系，但其流场中心固定于靶体表面，未考虑撞击动量导致的流场迁移。Croft^[82] 引入流场中心深度 d ，将流场中心下移至靶体内部，形成修正 MZ 模型（图 12（b））。修正后的喷射角度公式为：

$$\tan \delta_e = \frac{\tan \Delta / \cos \Delta - \tan^2 \Delta + (Z - 2)}{1 / \cos \Delta - \tan \Delta (Z - 1)} \quad (19)$$

式中， $\tan \Delta = d / r_0$ ， r_0 为喷射位置与流场中心的水平距离。MZ 模型可解释垂直撞击中喷射角度随坑体发展的变化，但仍假设流场中心固定。对于斜撞击，不同方位的喷射幕可能具有不同流场结

403 构, 单一固定流场中心难以解释下行方向小角度喷射、喷射幕偏移和坑体非对称扩展等现象。对此,
404 Anderson et al. [31] 通过 15° - 90° 撞击实验发现, 斜撞击中的 Z 值具有显著方位角依赖性, 可表示为:

405
406
$$Z = Z_0 + A \cos \phi \quad (20)$$

407 式中, Z_0 为垂直撞击条件下的 Z 值, A 为斜撞击流场不对称强度, ϕ 为方位角 (上行方向 $\phi = 0^{\circ}$)。

408 该模型说明, 斜撞击不仅改变喷射物速度和喷射角度, 还会改变挖掘流场本身的空间结构。

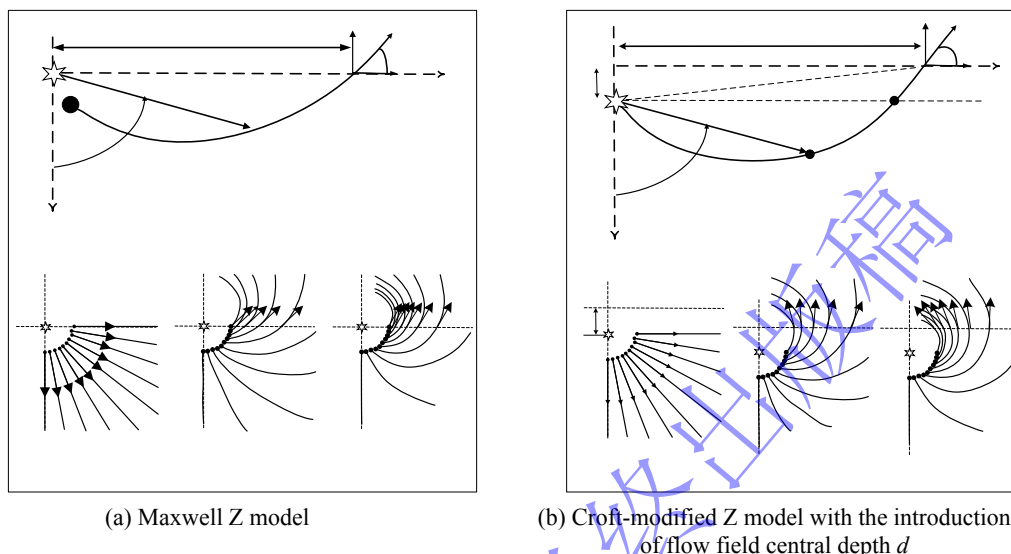


图 12 Maxwell Z 模型及修正 Z 模型 [31]

Fig. 12 Maxwell Z model and modified Croft Z model [31]

413 为进一步描述斜撞击下的非轴对称挖掘流动, Anderson et al. [31] 提出了双流场叠加模型, 认为垂
414 直撞击和斜撞击均包含动量驱动流场和挖掘流场: 前者主导早期坑体发展和喷射物非对称性, 后者主
415 要控制后期挖掘和坑体扩展。随后, Anderson et al. [100] 提出了“迁移流场中心” (shifted flow field
416 center, FFC) 假说 (图 13)。该假说认为, 斜撞击动能释放不能用单一静止点源描述, 而应视为一个
417 随时间向靶体内部和下行方向迁移的移动点源。将喷射幕分为上行、侧向和下行方向, 并分别赋予独
418 立移动的流场中心。该假说提高了 Z 模型解释斜撞击挖掘流动的能力, 也为建立三维非轴对称挖掘
419 模型提供了思路。

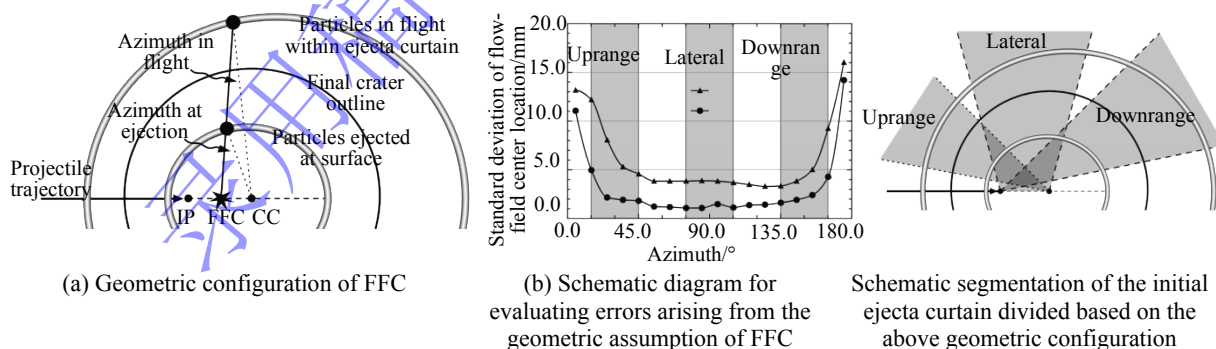


图 13 斜撞击迁移流场中心的结构 [100] (图未按比例绘制)

Fig. 13 Structure of the FFC under oblique impact [100] (The figure is not drawn to scale)

424 Kurosawa 和 Takada [63] 将 Z 模型预测的流线分为挖掘和位移分量 (图 14)。挖掘分量对应瞬态坑
425 半径以内、能够从靶体表面喷出的材料; 位移分量则对应未形成喷射物、而是在坑体形成后期参与内
426 部位移和结构隆起的材料。该研究结合 Melosh 残余速度理论 [64] (冲击波卸载后的剩余速度驱动挖掘
427 流) 与 Maxwell Z 模型, 从热力学平衡和能量守恒出发, 提出了无需依赖传统 π 群缩放律的解析模

型,可用于预测喷射速度和瞬态空腔半径。然而,斜撞击条件下的三维流场迁移、方位角差异和多因素耦合仍缺乏统一解析模型。

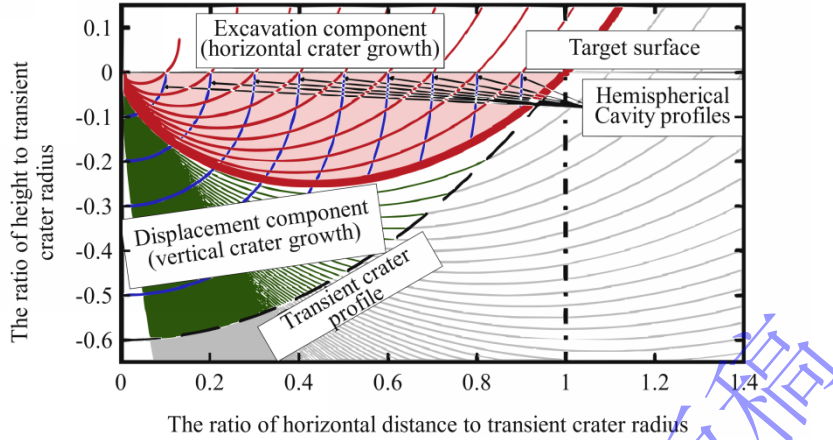


图 14 Z 模型中流场挖掘和位移分量的示意图^[63]
Fig. 14 Schematic diagram of flow field excavation and displacement components in the Z model^[63]

除流场模型外,喷射速度相似律也是描述挖掘喷射运动的重要理论。Housen et al.^[12]构建了喷射速度的点源相似律框架,认为在距离撞击点大于约一个弹丸半径、且撞击速度高于靶体声速的区域内,弹丸可近似为点源。点源假设的基本形式为^[12]:

$$u = f \{ a U^\mu \rho_p^\nu, \rho_t, g, x, Y \} \quad (21)$$

式中, u 为喷射速度, x 表示喷射位置和撞击点的距离, 其余参数同公式 (7)。对于距离撞击点大于约一个弹丸半径、但尚未接近坑缘的近源—中间挖掘区, 挖掘流粒子动能通常远大于克服重力势能和靶体强度所需能量, 因此可暂时忽略重力和强度作用。此时喷射速度可化简为幂律形式:

$$\frac{u}{U} = B_1 \left[\frac{x}{a} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^v \right]^{-1/\mu} \quad (22)$$

其中, B_1 为拟合常数。无论成坑过程最终处于重力控制还是强度控制, 在靠近撞击点但大于弹丸尺度的挖掘区内, 喷射速度均可近似满足上述幂律关系; 当喷射物初始位置逐渐接近坑缘时, 重力或靶体强度对物质运动的约束作用增强, 喷射速度开始偏离近源区幂律。为描述这一偏离过程, 后续研究通常在式 (22) 的基础上引入与坑半径 R 有关的修正项, 得到更完整的喷射速度相似律^[101]:

$$\frac{u}{U} = B_1 \left[\frac{x}{a} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^v \right]^{-1/\mu} \left(1 - \frac{x}{nR} \right)^q \quad (23)$$

式中, R 为成坑相似律给出的坑半径; q 为控制近坑缘喷射速度衰减的经验指数; n 为挖掘边界系数, nR 表示喷射物来源区的外边界。重力控制和强度控制条件下坑半径及挖掘边界不同, 因此, 重力和强度主导下的 n 分别取 n_G 和 n_S , 且通常有 $n_S < n_G$ 。

喷射速度的相似律形式可进一步利用撞击坑半径 R 的相似律模型推导:

$$R = f \{ a U^\mu \rho_p^\nu, \rho_t, g, Y \} \quad (24)$$

基于公式 (21) 和 (24), 进行无量纲化处理可得到如下关系:

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = f \left(\frac{x}{R} \right) \quad (25)$$

通过重力和强度主导下的撞击坑半径缩放公式:

$$\begin{cases} R\left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{1/3} = H_2\left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)^{(1-3\nu)^3} \left[\frac{Y}{\rho_t U^2}\right]^{-\mu/2} & (\text{strength regime}) \\ R\left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{1/3} = H_1\left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)^{(2+\mu-6\nu)[3(2+\mu)]} \left[\frac{ga}{U^2}\right]^{-\mu/(2+\mu)} & (\text{gravity regime}) \end{cases} \quad (26)$$

式中, H_1 和 H_2 为经验拟合常数。可以得到强度和重力相关的喷射速度相似律公式 (推导过程详见 Ref.^[101]) :

$$\begin{cases} u\sqrt{\frac{\rho_t}{Y}} = B_3\left(\frac{x}{R}\right)^{-1/\mu} & (\text{strength regime } B_3 = B_1((4\pi/3)^{1/3} H_2)^{-1/\mu}) \\ \frac{u}{\sqrt{gR}} = B_2\left(\frac{x}{R}\right)^{-1/\mu} & (\text{gravity regime } B_2 = B_1((4\pi/3)^{1/3} H_1)^{-(2+\mu)/2\mu}) \end{cases} \quad (27)$$

Housen 和 Holsapple^[101]整合多组撞击实验数据, 分析了撞击速度、弹靶密度、靶体孔隙度、强度及颗粒特征对喷射速度和质量分布的影响。研究表明, 撞击体参数的影响可通过点源相似律有效归一化, 超高速撞击喷射特征总体符合幂律分布; 靶体孔隙度是控制喷射速度和质量的重要因素, 孔隙度越高, 冲击能量耗散越强, 喷射速度和喷射质量越小; 靶体强度主要影响低速喷射物, 即接近坑缘的喷射物, 而高速喷射物受强度影响较弱。目前, 喷射速度相似律仍存在靶体性质耦合难以分离、高速喷射物数据不足、亚声速撞击和高孔隙材料实验验证不足等问题。

3.4 喷射物冲击变质产物

除喷射物运动外, 喷射物中的冲击变质产物也可记录材料经历的温压路径和喷射顺序。Johnson 和 Melosh^[102]结合 iSALE 数值模拟和解析模型, 指出超高速撞击喷射幕中可形成熔融液滴、熔融碎片和增生冲击角砾岩等产物, 如图 15 和图 16 所示。图 15 为 SiO_2 的 Hugoniot 曲线, 图 16 为喷射幕组分 (灰色代表破碎的固体物质, 深橙色代表熔融物质, 两者之间可能存在部分熔融物; 喷射物幕下侧的大块碎片由表面层裂产生)。其中, i) 描述了熔融碎片的形成过程: 从 t_1 到 t_2 时刻, 该处流体将从液相到达液-汽相, 流体碎片的大小取决于碎裂时的应变率。ii) 为熔融液滴的形成过程。 t_1 时刻, 气动力使液滴从球形平衡形状发生变形。在 t_2 时刻, 蒸汽的相对速度更大, 液滴受到的气动力超过表面张力, 导致液滴分裂成几个更小的液滴。iii) 为增生冲击角砾岩的形成过程: 熔融液滴不断包裹岩石碎片形成了增生冲击角砾岩。

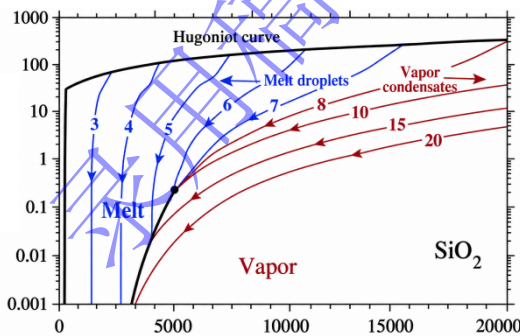


图 15 二氧化硅冲击绝热线^[102]

Fig. 15 Shock Hugoniot curve of silica^[102]

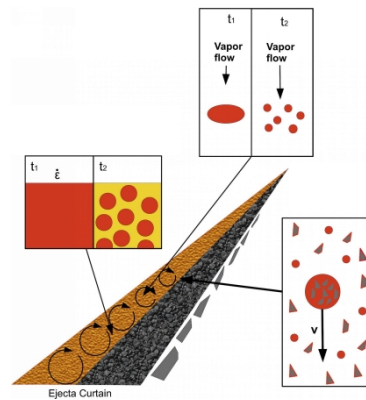


图 16 喷射幕中的冲击变质产物^[102]

Fig. 16 Shock metamorphic products within ejecta curtain^[102]

斜撞击条件下, 喷射物冲击变质产物的分布会进一步受到撞击角度和喷射顺序控制。Ma et al.^[24]分析了不同撞击角度下石英岩弹丸斜撞击石英岩靶体的喷射物温度分布, 如图 17 所示。研究发现, 不同撞击角度会导致下行方向喷射幕温度分层规律发生变化: 较大角度撞击时, 下行喷射幕温度通常由上层向下层逐渐降低; 中等角度撞击时, 中间层可能出现最高温区域; 低角度撞击时, 喷射顺序改

变可能导致下行喷射幕温度由上层向下层逐渐升高。该结果表明，喷射沉积物中冲击变质产物的空间分布可作为反演撞击角度和喷射顺序的辅助指标。

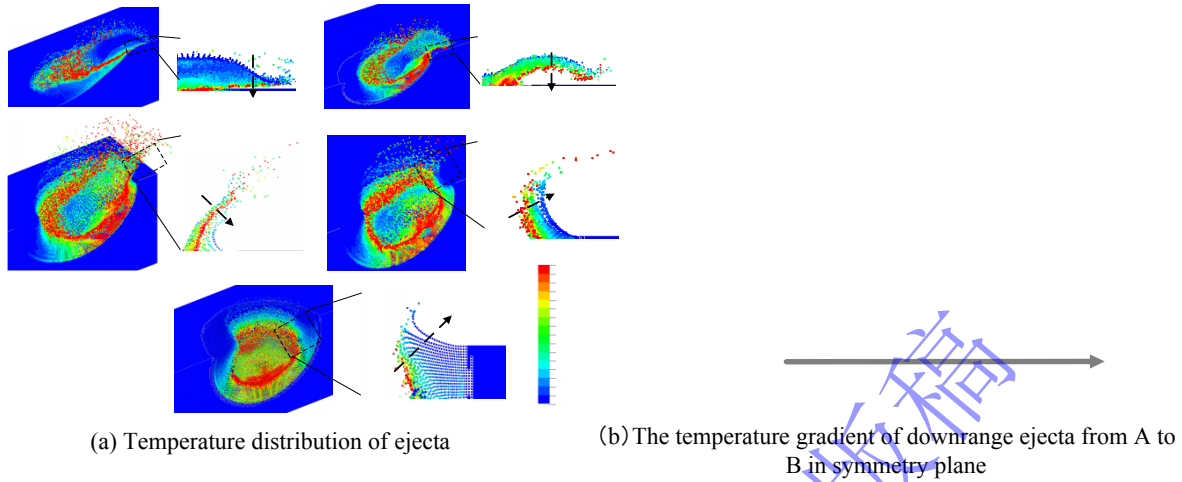


图 17 不同撞击角度下的喷射物温度分层^[24]
Fig. 17 Temperature stratification of ejecta under various impact angles^[24]

本节梳理了撞击体正/斜撞击成坑过程中喷射物运动的基本理论。根据产生阶段和机理的不同，认为喷射运动主要包括射流、擦射、层裂和挖掘喷射（其中，擦射仅发生在低撞击角度下）。并对正/斜撞击下喷射运动发生机理、运动模型和喷射物冲击变质特征展开了系统综述。在此基础上，建立靶体孔隙度、内摩擦、地形、材质等复杂因素相关的喷射物运动模型，是未来研究的重点和难点。

4 撞击角度对成坑过程的影响

撞击角度是撞击体撞击成坑过程中的核心控制参数之一。本文将撞击角度定义为撞击体运动方向与靶体表面的夹角， $\theta=90^\circ$ 表示垂直撞击，越小表示撞击越倾斜。撞击角度直接影响撞击体和靶之间的能量耦合效率、动量沉积方向和物质运动轨迹，进而控制撞击区温压分布、冲击变质特征、喷射物运动、瞬态空腔形态和最终坑形貌。深入认识撞击角度的作用机制，有助于反演天然撞击事件的初始参数，也可为行星表面演化、小天体撞击防御和高速冲击工程问题提供理论支撑^[103]。

撞击成坑过程通常可划分为接触压缩、挖掘和坍塌调整三个阶段^[6, 76]。该阶段划分最初基于垂直撞击提出，但也常用于分析斜撞击过程。与垂直撞击相比，斜撞击会破坏成坑过程的轴对称性，使冲击压力场、喷射物分布、瞬态空腔和最终坑形态均表现出明显的方位差异^[1, 14, 104]。第 3 节已系统阐述喷射物运动的基本理论，因此本节不再重复射流、层裂和挖掘喷射模型，而重点讨论斜撞击下各成坑阶段的动力学演化、冲击变质、坑形态发展及相似律修正。

4.1 接触压缩阶段

接触压缩阶段是弹靶能量传递的起始阶段，始于弹丸与靶体表面接触，止于弹丸自由面反射的稀疏波到达弹靶界面。该阶段决定冲击波初始传播、峰值压力分布、高温高压区位置和早期喷射行为。斜撞击条件下，该阶段的主要特征包括冲击压力场非对称、撞击区拉长凹陷、下行方向高压区偏移以及早期射流和擦射喷射等。其中，射流和擦射喷射的运动机制已在第 3.1 和 3.2 节中阐述，本节重点讨论撞击角度对压力、温度和冲击变质的影响。

实验和数值模拟表明，斜撞击与垂直撞击的核心差异在于冲击波传播和能量沉积的非轴对称性。斜撞击时，冲击波前沿沿弹丸运动方向发生倾斜，高压区集中于下行方向；上行方向则更早发生卸载，压力衰减更快^[22, 100]。随着撞击角度减小，最大压力区进一步向下行方向偏移，峰值压力整体降低，接触压缩阶段持续时间延长，如图 18 所示。该非对称压力场是后续喷射物分布、瞬态空腔偏移和最终坑形态差异的初始来源。

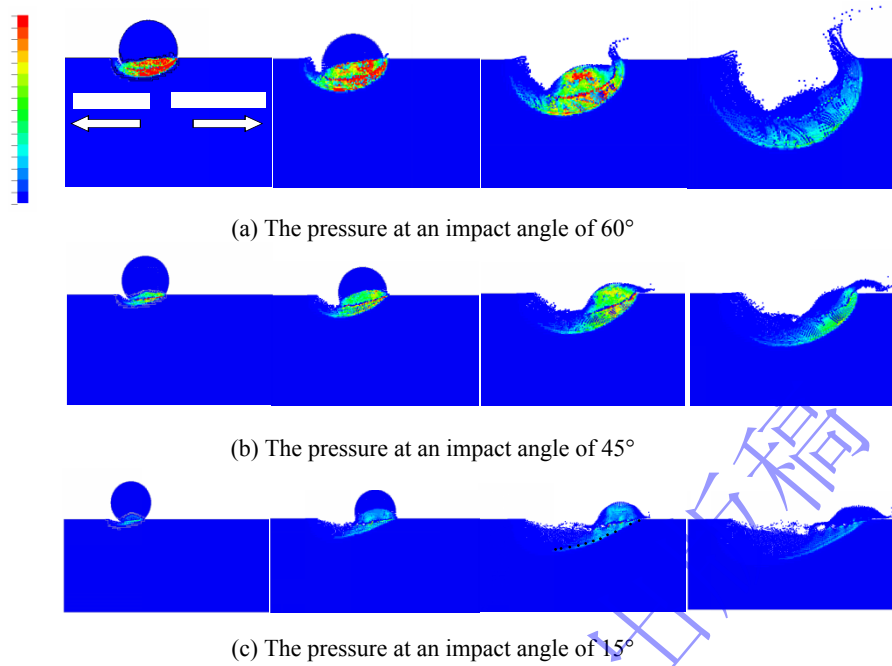


图 18 不同撞击角度下的接触压缩阶段压力云图对比^[24]

Fig. 18 Comparison of pressure contour plots during the contact compression stage at various impact angles ^[24]

在接触压缩阶段，撞击区材料会经历剧烈温压突变，并可能发生破碎、熔融、气化和高压相变。Pierazzo 和 Melosh ^[22] 采用三维数值模拟，研究了纯橄榄岩弹以 18 km/s 撞击橄榄岩靶体时的冲击相变特征。结果表明，平均峰值压力和温度均随撞击角度降低而减小，如图 19 所示。其中，平均压力峰值近似满足 $P_{90^\circ} \sin \theta$ (P_{90° 为垂直撞击压力峰值)，平均温度峰值更接近 $T_{90^\circ} \sin^{1.5} \theta$ (T_{90° 为垂直撞击温度峰值)。这说明斜撞击不仅降低有效冲击强度，也改变了高温高压区在靶体中的空间分布。

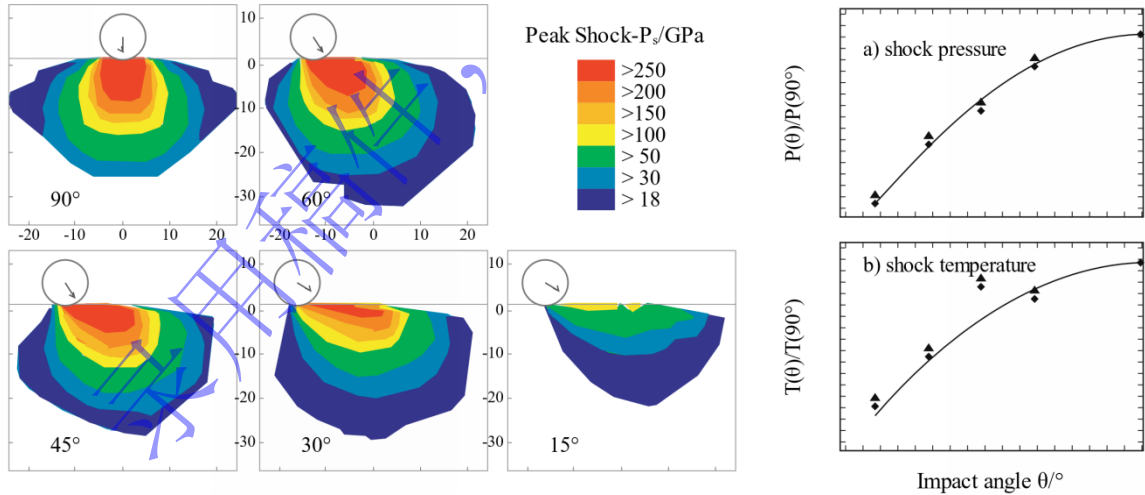


图 19 不同撞击角下对称截面的峰值冲击压力^[14]

Fig. 19 Peak shock pressure on symmetric cross-sections under different impact angles ^[14]

弹丸和靶体的冲击相变对撞击角度的响应存在差异。对于弹丸而言，垂直撞击时熔融和气化程度最高；随着撞击角度降低，弹丸熔融和气化比例逐渐下降。当撞击角度降低至 15° 时，弹丸可基本避免熔融和气化^[22, 105]，如图 20 所示。低角度撞击中弹丸的保存还受到撞击速度、材料性质及后续破碎过程的影响，不能仅依据撞击角度判断大块残余撞击体是否能够保存。

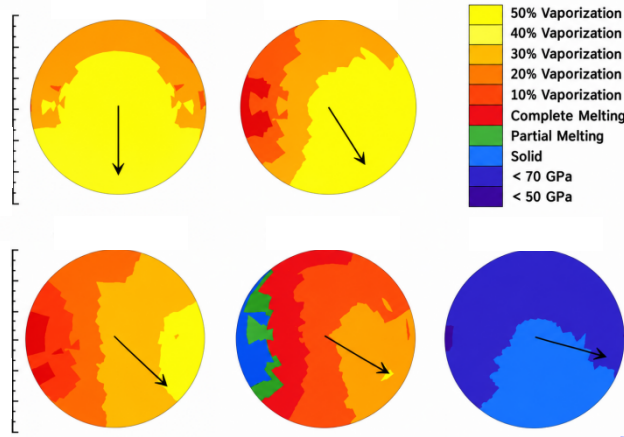


图 20 弹体在不同撞击角度下的相变分布^[14]

Fig. 20 Phase distributions of the projectile at different impact angles^[14]

对于靶体而言，斜撞击会使等压核和熔融区向下行方向偏移。Pierazzo et al.^[106] 通过垂直撞击模拟界定了冲击熔融的空间结构，指出等压核与熔融区不重合。其中，等压核指撞击中心点附近，冲击波压力几乎不随距离下降的高压核心区，其压力显著高于周围介质，是冲击熔融、高压相变及气化的主要发生区域；而熔融区深度更大、范围更广，且熔融体积不满足点源近似，而更接近能量标度律：

$$\frac{V_M}{V_{proj}} \propto \left(\frac{E_M}{U^2} \right)^{-3\mu_m/2} \quad (28)$$

其中， V_M 为熔融体积， V_{proj} 为弹体积， U 为撞击速度， E_M 为单位质量的熔化内能。 μ_m 为熔融体积缩放指数，用于描述早期冲击波加热控制下熔融或汽化体积随撞击速度的缩放关系，不同于前文点源相似律中的速度缩放指数 μ 。在此基础上，Pierazzo 和 Melosh^[22] 进一步提出斜撞击的体积压力衰减关系：

$$V_{>p} = K_2 \cdot V_{proj} \cdot \left(\frac{\rho U^2 \sin^2 \theta}{p} \right)^{\mu_v} \quad (29)$$

其中， K_2 为拟合常数， $V_{>p}$ 表示峰值压力超过 p 的靶体体积， V_{proj} 为弹体积。 μ_v 为体积压力衰减指数，主要描述峰值冲击压力大于给定阈值 p 的物质体积随归一化动压的缩放关系。该指数反映的是早期冲击波压力场的空间衰减特征，与前文喷射速度点源相似律中的速度耦合指数 μ 并不等同。研究表明，在 $30^\circ - 90^\circ$ 撞击角范围内， μ_v 稳定在 0.67 附近，而 15° 撞击时明显降低。熔融体积随撞击角度变化具有阈值特征： $45^\circ - 90^\circ$ 时熔融量较垂直撞击下降较小， 30° 时约降至垂直撞击的一半， 15° 时则不足垂直撞击的 10%。这表明低角度斜撞击会显著抑制熔融和气化过程。

材料强度和塑性变形也会影响斜撞击下的冲击加热。Wakita et al.^[23] 将材料强度引入斜撞击模拟，发现塑性变形可使靶体受热质量提高 2-10 倍；当撞击角度大于 45° 时，受热质量与垂直撞击相近，而小于 30° 时受热质量快速下降。该结果说明，低速垂直撞击和高速低角度撞击可能产生相近受热质量，但后者对应更低冲击压力，这为弱冲击陨石的形成提供了可能解释。

除了冲击压力分布不对称外，空腔边缘形状和喷射物分布不对称是斜撞击接触压缩阶段的直观特征。Ma et al.^[24] 通过三维斜撞击数值模拟发现，坑缘椭圆度在接触压缩阶段末期达到最大值；同时拟合了该阶段末期坑周喷射物运动距离和方位角的关系，认为喷射距离和方位角符合余弦分布，且撞击角度越大，拟合项数越少，喷射物分布越集中。

总体而言，接触压缩阶段是斜撞击非对称性的起点。该阶段形成的压力场、温度场和相变区偏移，会进一步影响挖掘阶段的喷射物分布和瞬态空腔形态。近年来，斜撞击下冲击变质产物的空间分布也逐渐成为撞击角度反演的重要指标。例如，下行方向高压矿物或石英平面变形构造（planar

deformation features, PDFs) 含量可能高于上行方向, 但该规律目前仍主要来自实验和模拟结果, 自然撞击坑中的验证仍有待加强。

4.2 挖掘阶段

挖掘阶段始于接触压缩阶段结束, 止于瞬态空腔达到最大体积, 是决定最终坑形、大小和对称性关键阶段。该阶段中, 靶体材料在冲击残余速度场和压力梯度作用下向外、向上运动, 形成喷射幕; 同时空腔向横向和深度方向扩展, 最终形成瞬态空腔。经典开挖流场通常可分为上部挖掘区和下部位移区, 如图 21 所示。挖掘区材料能够被抛出靶体并形成喷射沉积, 位移区材料主要向下、向外运动, 动能不足以离开坑体, 最终保留在坑内或参与后期结构调整。

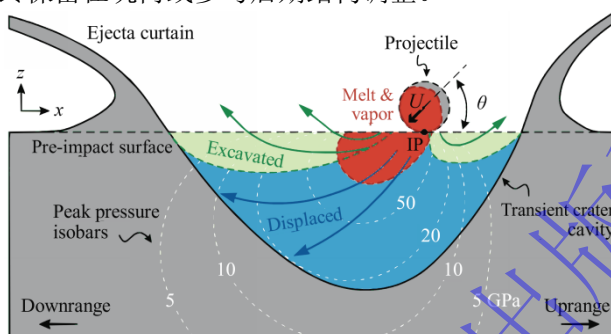
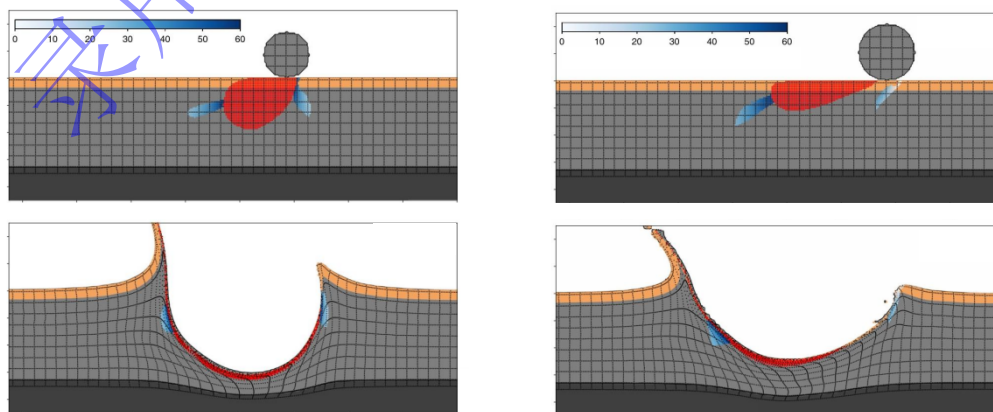


图 21 斜撞击开挖流场运动示意图^[107]

Fig. 21 Schematic diagram of excavated flow field motion under oblique impact^[107]

斜撞击下, 早期喷射物通常在下行方向更强, 上行方向较弱; 随着坑体生长, 喷射幕不对称性逐渐减弱, 挖掘流场趋于更对称的扩展状态。Raducan et al.^[28] 以双小行星重定向测试 (Double Asteroid Redirection Test, DART) 任务为背景, 研究了小行星表面斜撞击成坑过程中的动量传递和喷射物动力学。结果表明, 垂直动量传递效率 (净喷射动量与垂直撞击动量之比) 在不同撞击角下相对稳定, 但总动量传递随撞击角度降低而显著减小; 45° 撞击相较垂直撞击的动量传递可下降约 50%。喷射动量方向也会随撞击角度降低而倾斜, 并随坑体增长逐渐趋于垂直。这表明, 斜撞击喷射物不仅影响成坑形态, 也直接影响小天体偏转效率。

瞬态空腔是挖掘阶段的最终结果, 其形态和位置对最终坑形具有重要控制作用。Collins et al.^[108] 对希克苏鲁伯撞击坑的模拟表明, 随着撞击角度减小, 瞬态空腔中心向下行方向偏移量增大, 上行方向坑缘抬升减弱, 下行方向抬升增强, 坑体最深位置也向下行方向偏移, 如图 22 所示。Davison 和 Collins^[104] 进一步指出, 瞬态坑深度和体积对撞击角度的敏感性远强于瞬态坑直径; 瞬态坑深度主要由垂直速度分量控制, 而瞬态坑直径和体积同时受水平和垂直速度分量影响。当撞击角度大于 45° 时, 瞬态坑直径变化较小; 小于 45° 时, 瞬态坑直径和体积发生明显变化。



(a) Transient cavity generated at an impact angle of 60°

(b) Transient crater formed at an impact angle of 30°

图 22 希克苏鲁伯陨石坑在不同撞击角度下的瞬态空腔^[108] ($L=17\text{ km}$, $U=12\text{ km/s}$)

Fig. 22 Transient cavities of the Chicxulub crater at different impact angles ^[108] ($L=17\text{ km}$, $U=12\text{ km/s}$)

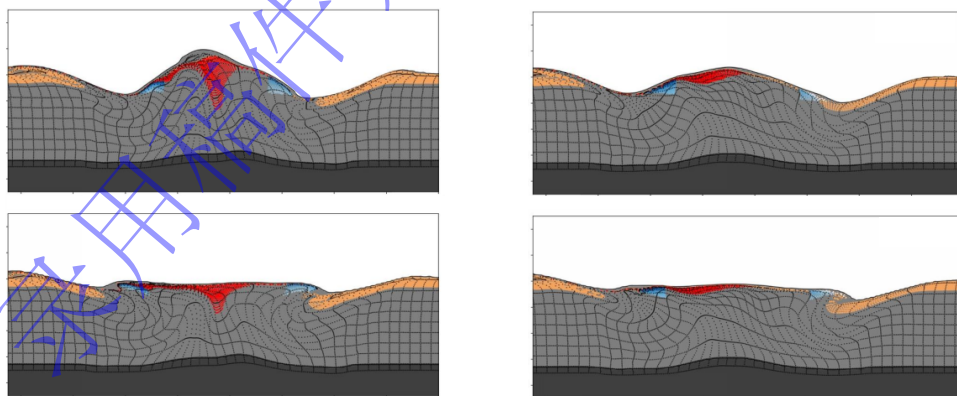
瞬态空腔椭圆度也是斜撞击的重要响应指标。Turtle et al.^[109] 的模拟表明, 当撞击角度由 90° 减小至 30° 时, 瞬态空腔椭圆度显著增加。瞬态空腔深度和体积随角度降低而减小。Elbeshausen et al.^[32] 提出能量竞争理论, 认为斜撞击初期沿弹丸运动方向发生定向能量耦合, 形成拉长的初始凹陷; 随后挖掘阶段的对称能量释放会逐渐削弱初始椭圆度。当撞击角度低于某一临界值时, 后续对称挖掘不足以消除初始非对称性, 最终便保留为椭圆坑。该机制解释了为什么许多斜撞击在早期形成椭圆空腔, 但最终坑缘仍可能接近圆形。

4.3 坍塌和调整阶段

坍塌和调整阶段始于瞬态空腔达到最大体积, 止于坑体形态趋于稳定, 是最终撞击坑形貌定型的阶段。该阶段主要包括坑外喷射物回落、坑壁滑塌、坑缘坍塌以及复杂坑中央隆起形成等过程^[110]。重力是驱动坑体坍塌和结构调整的主要因素, 靶体强度、内摩擦、瞬态空腔尺度和撞击能量共同决定坍塌规模和持续时间。

最终坑形态通常通过坑径、坑深、体积、椭圆度、坑缘完整性和中央隆起位置等参数描述。撞击坑直径为高出撞击前目标表面的地形边缘的直径, 表观深度为坑底表面到撞击前地表的深度, 真实深度为坑底损伤区到撞击前地表的深度。根据撞击坑尺寸和形态, 最终成坑类型可分为简单坑和复杂坑^[109]。对于简单坑, 垂直撞击通常形成近轴对称碗形坑, 斜撞击则主要表现为不同方位坑壁回流和坑缘坍塌的不对称^[111]。对于复杂坑, 垂直撞击会形成具有阶梯状边缘和中央隆起结构的坑, 斜撞击不仅影响撞击坑的平面形态, 还会改变中央隆起位置、隆起高度和阶地带结构^[108, 112, 113]。例如, Collins et al.^[108] 对希克苏鲁伯撞击坑的模拟显示, 斜撞击可导致中央隆起向撞击方向偏移, 且下行方向和上行方向的边缘高度存在差异, 如图 23 所示。

对于垂直撞击, 简单坑向复杂坑的转变取决于瞬态空腔尺寸、靶体强度、重力环境。当瞬态空腔较小或靶体强度足以抵抗坑壁重力不稳定时, 最终坑体可保持简单坑形态; 当瞬态空腔超过一定尺度后, 重力驱动的坑壁坍塌和地心回弹增强, 形成具有阶梯状坑壁和中央隆起的复杂坑。需要注意的是, 简单坑—复杂坑过渡直径并非固定值, 而是随天体重力、靶体强度和热状态改变。以地球岩质靶体为例, 该过渡值接近 3 km 。



(a) Collapse process at an impact angle of 60°

(b) Collapse process at an impact angle of 30°

图 23 希克苏鲁伯陨石坑在不同撞击角度下坍塌调整后的结构^[108]

Fig. 23 Collapsed and adjusted structures of the Chicxulub crater under different impact angles ^[108]

Wünnemann 和 Ivanov^[114]对垂直撞击下简单坑向复杂坑转变提出了基于重力和强度竞争的经验判据:

$$S = \frac{Y_t}{\rho_t g d_{\max}} + f \quad (30)$$

其中, S 为判断成坑类型的指标, S_{crit} 为简单-复杂坑临界转变阈值, ρ_t 为靶密度, Y_t 为靶内聚强度,

628 g 为重力加速度, $d_{\max}$ 为无强度条件下最大瞬态空腔深度, f 为干摩擦系数。 $S > S_{\text{crit}}$ 时, 最终成坑结果
629 倾向于简单坑; $S < S_{\text{crit}}$ 时, 最终成坑结果倾向于复杂坑。 $d_{\max}$ 可由经验关系估算^[7, 55, 115]:

630
$$\frac{d_{\max}}{a} \propto \left(\frac{U^2}{ga} \right)^{\gamma} \quad (31)$$

631 式中, γ 为最大瞬态空腔深度缩放指数, 由点源速度缩放指数 μ 推导得到 $\gamma = \mu / (2 + \mu)$; U 为撞击速度;
632 a 为弹半径。需要强调的是, Wünnemann 和 Ivanov^[114] 在标定该判据时所采用的 $Y_t = 25 \text{ kPa}$ 并不代
633 表完整岩石的实际强度, 而是声学流化作用下破碎岩石的等效内聚强度。只有采用这一等效强度时,
634 $S_{\text{crit}} = 1.001$ 才能较好对应月球和地球上的简单坑—复杂坑转变直径。因此, 在将该判据用于讨论斜撞
635 击成坑形态时, 相关 S 值应理解为基于等效流化强度的参考指标, 而不是由数值模型中实际岩石强
636 度直接给出的严格临界值。

637 斜撞击下简单-复杂坑的转变则更为复杂。目前尚缺乏适用于斜撞击条件的简单坑—复杂坑转变
638 判据。斜撞击会改变瞬态坑的深度、体积和深径比, 从而间接影响坑壁坍塌程度、中央隆起发育以及
639 最终坑径。对于相同撞击体, 倾斜撞击形成的瞬态坑通常更浅、深径比更低, 因而需要更大的撞击体
640 或更大的最终坑径才能达到与垂直撞击相同的简单坑—复杂坑转变状态。Davison 和 Collins^[104] 的数
641 值模拟也表明, 随着撞击角减小, 简单坑—复杂坑的临界转变直径会增大。

642 式 (30) 及临界值 $S_{\text{crit}} = 1.001$ 均基于垂直撞击条件标定, 目前尚缺乏针对斜撞击条件的系统实验、
643 三维数值模拟及天然撞击坑数据对该判据进行重新标定。若使用式 (30) 的 S 值进行标定, 假定靶体
644 材料参数、重力环境及临界阈值不随撞击角度变化, 则撞击角度主要通过改变瞬态空腔深度 $d_{\max}$ 影
645 响 S 的取值。基于垂直速度分量 $U \sin \theta$ 控制假设, 由式 (31) 可知, 随着撞击角减小, $d_{\max}$ 减小, 则
646 S 呈增大趋势。因此, 对于垂直撞击时成坑结果为复杂坑或简单—复杂过渡坑的工况 ($S < S_{\text{crit}}$), 撞击
647 角度减小可能使 S 接近甚至超过垂直撞击条件下的参考阈值 S_{crit} , 对应为最终撞击坑向简单坑形态发
648 展。需要强调的是, 上述 S 随撞击角变化的关系是基于 $d_{\max}$ 角度依赖性得到的间接推论, 目前尚缺
649 乏对 S 值的直接验证, 因此只能用于定性说明可能的形态演化趋势, 不能用于给出斜撞击条件下简单
650 坑—复杂坑转变的临界撞击角或临界坑径。

651 此外, 斜撞击本身会引入明显的方位非对称性。已有数值模拟表明, 上行方向与下行方向在坑壁
652 坡度、扩张过程、坍塌时序及坑缘高度等方面存在明显差异^[104]。因此, 斜撞击坑的简单—复杂形态
653 判别不能仅依赖 S 值, 还需要结合最终坑形态特征, 如坑壁坍塌程度、阶梯状构造、中央隆起是否发
654 育以及整体深径比等进行综合判断。斜撞击条件下 S 的角度依赖关系及 S_{crit} 的适用边界仍有待进一步
655 标定。

656 4.4 撞击角度对成坑形态参数和相似律的影响

657 第 2.2 节已介绍经典成坑相似律的基本形式。需要指出的是, π 群相似律和点源近似理论主要基
658 于垂直撞击、均质靶体和平坦靶面等理想条件建立, 通常未显式包含撞击角度。因此, 在其基础上重
659 点讨论撞击角度对抗径、坑深、坑体积、椭圆度和喷射物沉积分布等形态参数的影响, 并总结已有研
660 究对经典相似律的角度修正。

661 最直接的角度修正是采用垂直于靶面的速度分量 $U \sin \theta$ 替代撞击速度 U 。该处理能够反映
662 撞击角度减小时有效成坑能力减弱的总体趋势, 但斜撞击并不等同于垂直速度分量减小。斜撞击会导
663 致冲击压力场、残余速度场、挖掘流场和喷射物沉积分布发生显著方位不对称, 使坑体中心向下行方
664 向偏移, 上行方向喷射物削弱, 下行方向喷射物增强, 并在低角度撞击下形成椭圆坑、沟槽状坑或蝶
665 翼形喷射毯。因此, $U \sin \theta$ 修正只能描述部分尺度效应, 难以完整解释斜撞击成坑的非轴对称演化过
666 程。

667 撞击角度对抗径、坑深和坑体积的影响并不完全一致。总体来看, 坑深和瞬态坑体积对撞击角度
668 更敏感, 而坑径在较大撞击角度范围内变化相对较弱。Holsapple et al.^[11] 通过离心机实验 (靶体为

砂, 弹体为铝球, 速度 2 km/s) 发现, 随着撞击角度由 90° 降低至 60°、30° 和 15°, 坑深相对于垂直撞击持续降低, 说明坑深主要受垂直方向能量传递效率控制。Davison 和 Collins^[104] 的模拟也表明, 瞬态坑深度和体积对撞击角度的依赖性高于瞬态坑直径; 当撞击角度大于 45° 时, 瞬态坑直径变化较小, 而小于 45° 时坑径和体积明显下降。

坑体积与撞击角度之间通常表现出与 $\sin\theta$ 相关的缩放关系, 但具体指数受成坑机制和靶体材料性质影响。Gault 和 Wedekind^[26] 的斜撞击实验表明, 花岗岩靶在撞击成坑过程中从原始位置移开的靶材质量近似随 $\sin^2\theta$ 变化, 而颗粒靶的成坑推移质量近似随 $\sin\theta$ 变化。其中, 近乎无黏结的石英岩砂靶实验结果与 $\sin\theta$ 关系吻合较好。由于成坑推移质量与坑体积成正比, 因此成坑体积可表示为:

$$V_\theta / V_\perp \approx \sin\theta \quad (32)$$

其中, V_θ 为撞击角度为 θ 时的坑体积, $V_\perp$ 为垂直撞击坑体积。Chapman 和 McKinnon^[116] 基于垂直速度分量假设, 将 $U\sin\theta$ 代入强度控制相似律, 得到致密岩石和金属靶中坑体积的近似关系:

$$V_\theta / V_\perp = \sin^{1.7}\theta \quad (33)$$

该关系与部分低速撞击实验结果基本一致, 但并不适用于所有弹靶材料和撞击速度条件。

Elbeshhausen et al.^[117] 进一步考虑靶体内摩擦对斜撞击成坑的影响, 开展了 200 余组三维数值模拟 (撞击角度在 30° -90° 之间, 弹尺寸范围为 0.325–3 km, 弹速为 6.5 km/s), 部分模拟结果如图 24 所示。结果表明, 撞击角度大于 30° 时, 斜撞击通常仍可形成近圆形坑; 随着撞击角度降低, 坑中心向下行方向偏移, 坑体积、坑径和坑深均减小。研究发现, 对于高摩擦靶体 (摩擦系数 $f \approx 0.7$, 对应砂土), 可通过垂直速度分量假设得到斜撞击下的坑体积相似律:

$$\pi_v = K_3 \pi_2^{-\sigma} \sin^{2\sigma}\theta \quad (34)$$

式中, K_3 为拟合常数, 体积缩放指数 σ 同公式 (4) 一致。低摩擦靶体明显偏离该规律, 表明靶体力学性质会影响角度修正相似律的适用范围。该研究还给出了瞬态坑和最终坑直径的角度缩放关系:

$$D_\theta / D_\perp = \sin^\tau\theta \quad (35)$$

其中, τ 为拟合缩放指数。已有结果显示, 瞬态坑和最终坑对应的 τ 值不同, 表明撞击角度对不同演化阶段的坑径影响并不一致。

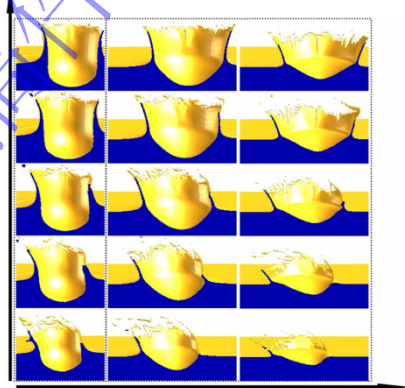


图 24 直径 1 km 的弹体以 6.5 公里/秒在不同撞击角度和靶体摩擦系数下撞击形成的瞬态坑^[117]

Fig. 24 Transient craters formed by a 1 km-diameter projectile impacting at 6.5 km/s under various impact angles and target friction coefficients^[117]

由上述研究可以看出, 斜撞击条件下坑体积和坑径的角度修正关系具有明显的材料与机制依赖性。不同关系式所依据的数据来源、靶体性质、撞击参数范围及成坑主导机制并不相同, 因此其角度修正形式及相应参数具有特定的适用条件, 不宜脱离具体物理背景进行直接比较或外推。为便于系统比较

701 各关系式的物理基础及适用边界,表1汇总了式(32)~(35)的数据来源与研究方法、靶体类型、
702 参数范围与适用条件、成坑主导机制、角度修正形式及其主要适用性与局限。

703 由表1可见,斜撞击成坑的角度修正指数并非普适常数,其取值与靶体材料性质、成坑主导机制
704 及坑尺度表征方式密切相关。此外,现有缩放关系多基于实验室尺度的撞击实验或特定条件下的数值
705 模拟,其在行星尺度撞击事件中的适用性仍需进一步验证。因此,各关系式更适合作为特定参数区间
706 内的经验或半经验修正,而不宜直接跨材料、跨尺度组合使用。在应用相关缩放关系时,应充分考虑
707 其建立所依据的物理条件及参数范围,避免将特定材料或撞击条件下得到的经验关系直接推广至其他
708 成坑环境。

表1 斜撞击下的部分成坑尺度缩放关系适用范围

710 Table 1 Applicability of selected crater scaling relationships to oblique impacts

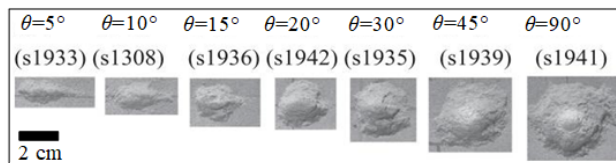
关系式	数据来源	靶体类型	参数范围/适用条件	主导机制	角度修正形式	适用性与局限
(32)	文献 ^[26] / 实验	无黏结砂靶	$U=1.8\sim6.8\text{ km/s}$ $\theta=0\sim90^\circ$ $L=1.6\sim12.5\text{ mm}$	颗粒靶经验关系; 研究通常归入重力控制	$\sin\theta$	特定颗粒靶,不宜直接推广至强度靶
(33)	文献 ^[116] / 理论推导	致密岩石、 金属靶	垂直速度分量假设	强度主导	$(\sin\theta)^{1.7}$	水平速度分量作用可忽略;与部分低速实验相符,非普适关系
(34)	文献 ^[117] / 模拟	无黏聚摩擦 靶, $f\approx0.7$	$\theta=30^\circ\sim90^\circ$ $U=6.5\text{ km/s}$ $L=0.325\sim3\text{ km}$	重力控制下受内 摩擦影响	$(\sin\theta)^{2\sigma}$	高摩擦靶符合较好,低摩擦靶明显偏离
(35)	同(34)	同(34)	同(34)	同(34)	$(\sin\theta)^{\tau}$; 低速重力控制的无黏聚靶 $\tau\approx0.33$	非普适常数,靶摩擦性质和坑尺度定义影响角度效应

711 撞击坑几何形态具有尺度依赖性^[118],椭圆度则常用于辅助识别低角度斜撞击。椭圆度通常定义
712 为坑缘最大直径与最小直径之比,相关研究常以1.1作为区分近圆形坑与椭圆坑的参考值^[32, 119]。观
713 测中的明显椭圆坑占比较低,其比例和形成阈值随坑尺度、材料性质及判别方法变化,不宜将固定的
714 椭圆度区间直接对应于统一的撞击角范围。斜撞击初期形成的拉长空腔可在后续挖掘与坍塌过程中趋
715 于圆形;当后续演化不足以消除初始非对称性时,最终坑形才会保留明显椭圆特征。Elbeshhausen 等
716 ^[32]基于近800组三维超高速撞击模拟,提出形成椭圆坑的最大撞击角度 θ_{crit} 可表示为成坑效率的函数:
717

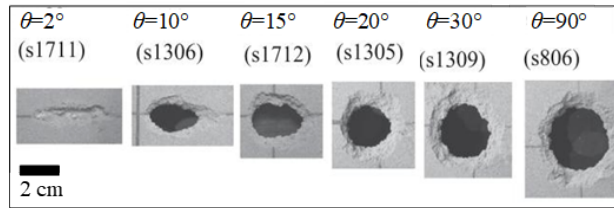
718
$$\theta_{\text{crit}} = 90^\circ (D_{\perp}/L)^{-0.82} \quad (36)$$

719 其中, $D_{\perp}$ 为垂直撞击坑直径, L 为弹直径。该关系表明,成坑效率($D_{\perp}/L$)越低,形成椭圆坑所需
720 的临界撞击角越大;椭圆坑形成不仅受撞击角度控制,也与撞击体尺寸、速度、靶体强度和成坑机制
721 有关。研究将传统“撞击-爆炸类比”的适用范围限定在大于临界角的撞击事件。

722 Michikami et al. ^[119]进一步通过脆性靶体实验发现,椭圆坑临界角随靶体强度升高而增大,且低
723 速撞击更容易形成椭圆坑,如图25所示。该图采用直径7.14 mm、撞击速度2.3 km/s的尼龙弹丸。
724 对于接近月球表面强度的脆性靶材,形成椭圆坑的临界撞击角度为 $15^\circ\sim20^\circ$,且地下空腔不改变撞击
725 坑的尺寸与椭圆形态,仅形成贯穿凹坑。



(a) Cratering result of solid target

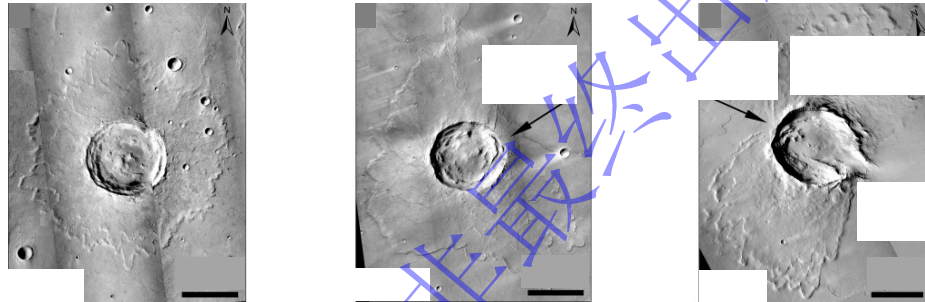


(b) Cratering result of target with subsurface cavity

图 25 不同角度撞击实心靶体和带地下空腔靶体的成坑结果^[119]

Fig. 25 Craters formed in solid targets and targets containing subsurface cavities at different impact angles^[119]

喷射物沉积分布形态通常比坑缘形态更敏感地记录斜撞击信息，因此也是反演撞击方向和撞击角度的重要依据^[120]。喷射物沉积形状为识别撞击角度提供了一种半定量方法，如图 26 所示。当撞击角度超过 40° 时，坑周喷射毯分布较为均匀；当撞击角度降低至约 20°-35° 时，上行方向可能出现近似 V 形的喷射物缺失区，即“禁止方位角区域”（forbidden azimuthal zones）^[26]，而下行方向有明显沉积；在极低角度撞击下，下行方向也可能出现沉积空白，形成蝶翼形沉积毯^[26, 121]。对于较大撞击坑，地质结构、近端和远端喷射物的分布不对称、玻璃陨石和冲击熔融物的落区，以及喷射沉积中心与坑中心之间的位置关系（从坑中心到挖掘流场中心即为撞击方向），均可用于判断撞击方向^[16, 122, 123]。



(a) Near-vertical impact crater

(b) Oblique impact crater

(c) Highly oblique impact crater

图 26 火星上不同撞击角度下的成坑形态^[47]

Fig. 26 Crater morphologies on Mars formed at different impact angles^[47]

除喷射沉积形态外，冲击变质产物的空间分布也可作为斜撞击参数反演的重要证据^[124]。地球撞击坑常受到构造活动、风化剥蚀和沉积覆盖影响，坑缘形态和喷射毯往往难以完整保存，此时冲击变质特征可为撞击方向和角度提供约束。产生冲击变质效应的压力远高于地质作用的压力，其冲击变质产物通常对应于距离地面 1000 km 深度的静压产物。冲击作用使这些高压变质产物分布于地表，成为识别撞击构造的标志。Matthews et al.^[123] 以澳大利亚 Gosses Bluff 撞击结构为例，结合冲击压力计观测到的冲击变质分布与三维数值模拟，利用中央隆起中冲击变质强度由上行方向向下行方向增强的空间规律，反演出该结构的撞击方向和撞击角度，为受侵蚀或掩埋撞击构造的参数反演提供了新方法。

总体而言，撞击角度对成坑形态参数的影响具有阶段性和参数选择性。在接触压缩阶段，撞击角度主要控制压力场、高温高压区和冲击变质产物的不对称分布；在挖掘阶段，撞击角度主要控制瞬态空腔、喷射物速度场和坑体椭圆度；到坍塌调整阶段，则进一步改变最终坑形态和复杂坑内部结构。现有研究已提出 $U \sin \theta$ 修正、体积正弦缩放、直径角度指数缩放和椭圆坑临界角等经验关系，但尚未形成统一的斜撞击成坑相似律。其主要原因在于，斜撞击成坑不仅受撞击角度控制，还与靶体摩擦、强度、孔隙度、重力环境、撞击速度和复杂地形密切相关。

此外，大型撞击坑不对称性成因存在争议。部分研究认为希克苏鲁伯撞击坑中央隆起偏移可能源于斜撞击^[125, 126]，但地外撞击坑统计结果显示，中心隆起偏移与撞击角度之间并不存在稳定对应关系^[127-129]。Collins et al.^[130] 发现希克苏鲁伯撞击坑阶地不对称可能主要受预存水深和沉积物厚度差异控制（水层缓冲能量、厚沉积物降低靶体强度，共同引发形态差异），而非单纯由撞击角度决定。这表明，在解释大型撞击坑不对称性时，应同时考虑撞击角度、撞击能量和靶体预存结构等因素。未来

研究需要加强斜撞击与复杂靶体耦合作用下的系统实验和三维数值模拟，建立能够同时考虑撞击角度、靶体力学性质和地质结构的多参数成坑相似律。

5 复杂靶体条件对撞击成坑的影响

自然撞击事件通常并非发生在理想的平坦、均质靶体之上，而是受到地形、靶体物性差异、分层结构、孔隙度和节理裂隙等多种复杂靶区因素的共同制约。与平坦均质靶体相比，复杂靶区条件会改变冲击波传播路径、能量沉积方式、物质迁移规律和坑壁稳定性，进而影响瞬态坑发育、喷射物运动、最终坑形态和成坑相似律的适用范围。复杂靶区条件下的成坑过程是理解自然撞击坑形态差异、喷射物分布异常和尺度律偏离的重要基础。因此，本节重点围绕复杂靶区条件对成坑过程和最终成坑类型的影响展开综述。

5.1 地形对撞击成坑的影响

实际天体表面普遍存在复杂地形，如斜坡、表面沟壑、表面多撞击坑^[53]、高山、弯曲和锥形表面。这些地形条件通常会与斜撞击共同作用，使成坑过程明显偏离平坦靶体垂直撞击的理想模型。近年来，随着深空探测任务和实验室模拟技术的发展，斜撞击与复杂地形耦合作用下的成坑问题受到越来越多关注。例如，DART 任务、Hayabusa2 任务以及月球、小行星表面高分辨率影像均显示，局部地形、巨砾分布和表面粗糙度可显著影响撞击坑形态和喷射物分布^[131]。此外，海林^[33]、吉林白鸡峰^[132]和广东金林^[133]等地球特殊地形撞击坑案例，也为复杂山地地形条件下撞击坑的识别、保存与改造研究提供了重要天然样本，如图 27 所示。

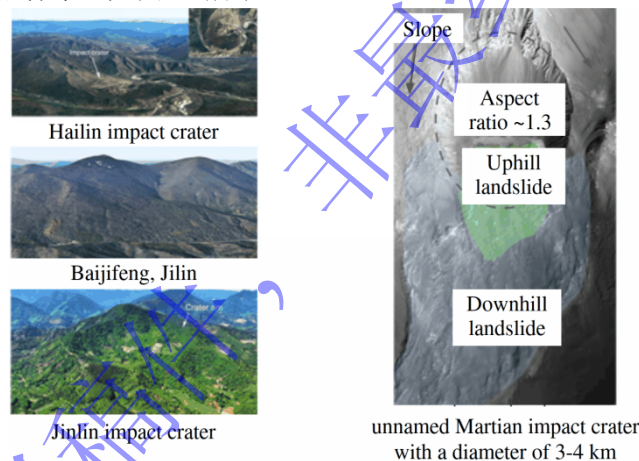


图 27 地球山地与火星坡面撞击坑实例
Fig. 27 Examples of impact craters in terrestrial mountains and on a Martian slope

5.1.1 斜坡地形

斜坡是行星和小天体表面最常见地形类型之一。灶神星、月球、火星以及多颗小行星表面均发育大量位于坡面上的非圆形撞击坑。Krohn et al. ^[35]对灶神星上 2892 个非圆形撞击坑进行统计分析，发现斜坡撞击坑的形态与坡度、坡向和撞击角度密切相关，并将其划分为五种类型（图 28）。A 型撞击坑具有平滑的下坡边缘和锐利的上坡边缘，两者之间通常由近直线边界分隔；B 型撞击坑坑形细长，上坡边缘与坡面融合，下坡边缘较低；C 型撞击坑喷射物在坑周相对均匀分布，坑底呈碗状，上下坡形态差异较小；D 型撞击坑剖面呈 V 形；E 型撞击坑侧向拉长，上坡边缘较陡，下坡边缘较缓。除 C 型外，多数斜坡撞击坑的喷射物主要分布于下坡侧，上坡侧喷射物相对较少，说明坡面重力分量和坑壁坍塌对最终坑形具有重要控制作用。

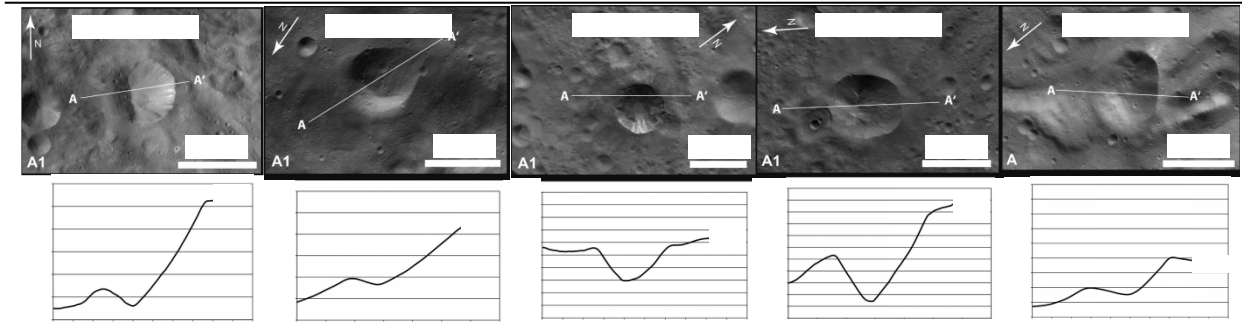


图 28 斜坡撞击坑的形态特征分类^[35]

Fig. 28 Morphological classification of impact craters on sloped terrain^[35]

为理解靶体物理性质、坡度和撞击能量对撞击坑形成方式及特征尺寸的影响，研究者开展了不同形式的斜面靶撞击实验。早期实验多采用单变量控制方法，分别改变坡面倾角 ψ （坡面和水平方向的夹角）、撞击角度 θ 或撞击能量^[18, 134, 135]。如图 29 所示，以撞击能量为 0.58 J 的不锈钢球体垂直撞击颗粒靶时， $\psi=0-16^\circ$ 时形成完整坑缘撞击坑； $\psi=22-26^\circ$ 时，形成破损坑缘撞击坑； $\psi=34^\circ$ 时，仅形成浅凹陷。随着坡面倾角 ψ 增大，撞击坑通常浅，并沿斜坡方向拉长；下坡坑缘增厚，上坡侧坑缘变薄。当坡面倾角超过一定临界值后，上坡坑壁开始发生明显坍塌；当坡角接近靶体颗粒的休止角或内摩擦角时，瞬态空腔会发生大规模重力调整，坑底可能形成阶地或被滑塌物质部分充填，最终坑形明显偏离轴对称形态^[134]。相关实验表明，坑壁坍塌规模主要由坡面倾角控制^[18, 134]，坡度对最终坑形的构造改造作用往往强于颗粒粒径、撞击能量等因素。

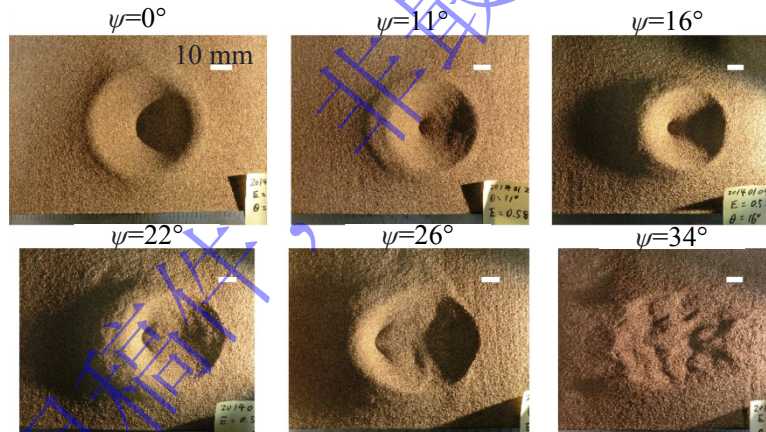


图 29 不同坡面倾角下颗粒靶的垂直撞击成坑形态^[134]，照片拍摄方向垂直于靶体表面，下坡方向朝左

Fig. 29 Crater morphology following vertical impacts into granular targets with different slope angles^[134]. Photographs are taken normal to the target surface, with downhill to the left

天然斜坡靶体往往并非完全干燥，颗粒间可能存在液桥、冰胶结或细粒黏结作用，因此湿润颗粒层的坍塌行为与干燥颗粒层存在显著差异。Takizawa et al.^[135] 不同含水率的湿润玻璃珠颗粒层作为靶体，改变靶体倾斜程度，使塑料弹以约 32 m/s 速度垂直撞击靶面中心。实验将撞击结果划分为两类：一类为凹坑模式，即形成稳定、较对称的撞击坑，未出现整体滑移；另一类为坍塌模式，即整个颗粒层沿底部发生滑移，瞬态坑被滑塌物质完全或近完全抹去。研究发现，当坡面倾角接近湿润颗粒层最大稳定角 $\psi_{\square}$ （指湿润颗粒层开始沿容器底部滑移运动时的临界倾角），且撞击产生的底部峰值加速度足够大时，更容易触发整体滑移。低含水率下， $\psi_{\square}$ 随含水率升高而增大；当含水率超过临界值后， $\psi_{\square}$ 趋于稳定。撞击加速度随深度呈幂律衰减，径向分布近似符合高斯衰减，整体表现出各向异性衰减特征。该研究将湿润颗粒层简化为斜坡上的滑块，基于库仑摩擦建立坍塌临界条件：

$$g \sin \psi > \xi (g \cos \psi - A) \quad (37)$$

其中, ψ 为斜坡倾角, ξ 为滑块与底部的有效摩擦系数, A 为冲击驱动的有效加速度。研究指出撞击诱发的有效加速度可削弱法向压力、降低抗滑力, 从而触发整体滑移。此类研究说明, 含水率和黏聚力不仅改变颗粒层强度, 也会改变撞击后坡体失稳的临界条件。

前述实验多分别控制坡度或撞击角度, 未能系统讨论三维斜撞击与斜坡地形的耦合作用。

Takizawa 和 Katsuragi^[21] 以丰浦砂为靶体, 实现靶体倾角与撞击角度的联合调控 (图 30), 其中靶体倾角为 $0^\circ - 30^\circ$, 文中用于区分上坡与下坡入射的有向撞击角为 $10^\circ - 170^\circ$, 对应与靶面夹角的锐角范围为 $10^\circ - 90^\circ$, 弹丸撞击速度为 $7 - 97 \text{ m/s}$ 。研究发现, 瞬态坑仍主要沿局部坡面法线方向发展, 初始喷射幕近似对称; 而最终坑的非对称性主要由靶体倾角控制, 撞击角度主要影响坑体大小, 对最终坑非对称性的贡献相对较弱。基于坑壁坍塌程度, 该研究将成坑模式划分为三类: 第一类为对称坍塌模式, 主要出现在坡角接近 0° 时, 瞬态坑壁各向同性轻微坍塌, 坑体近似圆形, 坑缘较完整; 第二类为非对称坍塌模式, 主要出现在坡角 $0^\circ - 25^\circ$ 时, 上坡壁发生显著坍塌, 坑体沿坡向拉伸, 最深点向下坡方向迁移, 上坡坑缘部分消失; 第三类为灾难性坍塌模式, 主要出现在坡角约 30° 、接近休止角时, 上坡壁发生大规模滑塌, 滑塌物质充填坑体, 使坑腔趋于平坦, 仅保留微弱凹陷。

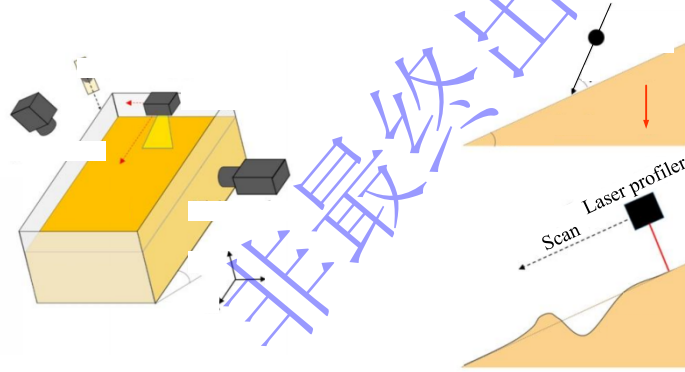


图 30 倾斜颗粒靶实验^[21]

Fig. 30 Experiments on inclined granular targets^[21]

基于 π 组量纲分析, Takizawa 和 Katsuragi^[21] 在传统平坦靶体垂直撞击相似律基础上引入 $\sin \theta$ (撞击角因子) 和 $\cos \psi$ (斜坡倾角因子), 对成坑体积、直径、长宽比和深径比进行了无量纲缩放。斜坡撞击坑的体积缩放定律为^[21]:

$$\frac{\rho_t V}{m} = 0.14 (\cos \psi)^{4.5} \left[\frac{gL}{U^2 \sin \theta} \right]^{-0.52} \quad (38)$$

其中, ρ_t 为靶体密度, V 为坑体积, m 为弹体质量, g 为重力加速度, L 为弹体直径, U 为撞击速度; 该公式表明, 坑体积与 $(\cos \psi)^{4.5}$ 、 $(\sin \theta)^{0.52}$ 正相关, 与传统重力参数负相关。坑横向直径 D_{cy} 与斜坡倾角无关, 仅受撞击角度控制, 缩放公式为^[21]:

$$\frac{D_{cy}}{2} \left[\frac{\rho_t}{m} \right]^{1/3} = 0.53 \left[\frac{gL}{U^2 \sin \theta} \right]^{-0.19} \quad (39)$$

得到坑长宽比为^[21]:

$$\frac{D_{ex}}{D_{cy}} = (\sin \theta)^{-0.2} (\cos \psi)^{-3} \quad (40)$$

结果表明, 坑体积可由传统重力控制参数以及撞击角、坡角修正项共同描述; 坑横向直径主要受撞击角度控制, 而沿坡向的坑直径则与坡度和撞击角度共同相关。其研究在低速颗粒靶条件下建立了斜撞击—斜坡地形耦合的经验缩放关系, 为复杂地形下实验结果的尺度外推提供了重要参考, 并在一

一定程度上拓展了传统平坦靶体成坑相似律的适用范围。但该研究仍存在一定局限：靶体为无黏结颗粒介质，未考虑岩石靶体的黏结性、层理、孔隙度和损伤演化；撞击速度低于靶体声速，未涉及自然超高速撞击中的强冲击波、熔融、汽化和弹体破碎；此外，弹体自旋、大气阻力、熔融物流动和复杂坡面粗糙度等因素仍未纳入模型。因此，其结果更适合作为颗粒靶和低速撞击条件下的机制参考，而不能直接等同于所有行星尺度超高速撞击过程。

5.1.2 目标曲率的影响

小天体低重力环境下，成坑过程由靶体强度主导，当撞击坑尺寸接近天体半径或局部曲率半径时，靶体曲率 ε 的影响不可忽略。传统成坑相似律多假设靶面为平面，但对小行星、彗核和不规则小天体而言，靶面曲率会改变冲击波与自由面的相互作用、层裂范围和喷射物弹道，从而影响表观成坑效率。

Suzuki et al. [136] 考虑靶体表面曲率因素设计了 3.4 km/s 尼龙弹垂直撞击不同直径的石膏球形靶实验，如图 31 所示。实验结果表明，所有撞击坑均由中心深圆形凹坑和周围不规则层裂区组成（图 32），与平坦脆性材料成坑特征相似。然而，随着归一化曲率 χ （弹与靶直径之比）增大，层裂区显著扩展，而中心凹坑的体积、深度和半径基本保持稳定。坑体整体体积和半径随曲率增大而增加，当归一化曲率 χ 达到一定值后，层裂区体积超过中心凹坑，成为成坑效率提升的主要原因。其机制在于，较高曲率使冲击波等效中心到靶体自由面的距离缩短，拉伸应力诱发的材料层裂更易发生。该研究指出，若仍采用未考虑曲率效应的平坦靶体缩放定律，可能高估形成小行星大型撞击坑所需的撞击体尺寸。因此，在反演小天体大型撞击坑的撞击条件时，需要考虑靶面曲率对成坑效率的放大作用。

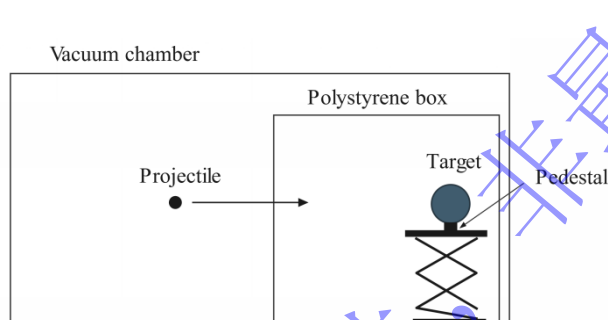


图 31 弹撞不同曲率石膏靶的实验装置^[136]
Fig. 31 Experimental setup for impact tests on gypsum targets with varying curvatures^[136]

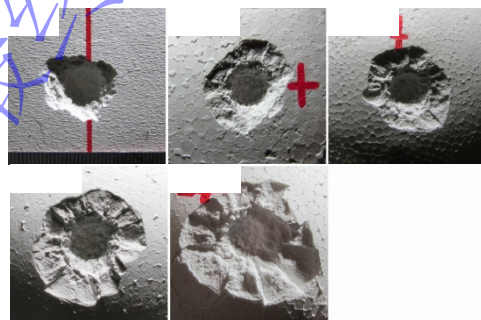
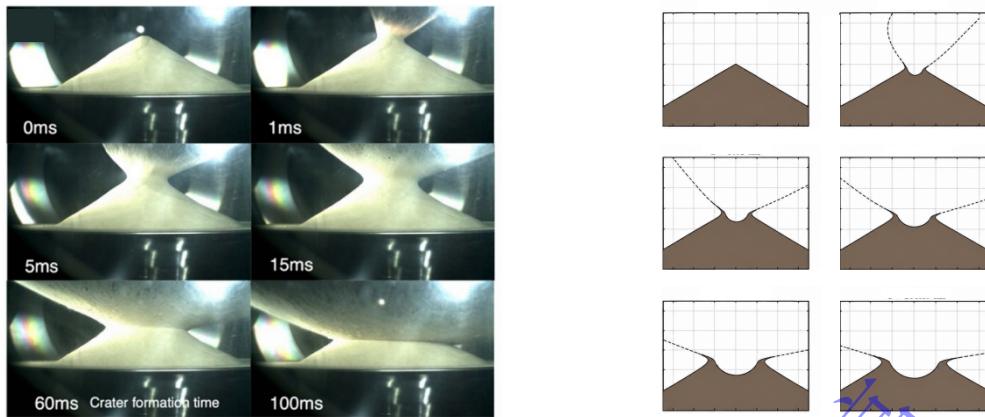


图 32 不同归一化曲率下的撞击坑结果^[136]
Fig. 32 Impact crater results under different normalized curvatures^[136]

5.1.3 锥形靶体的影响

目前，曲面靶体撞击实验主要集中于强度控制成坑条件；相比之下，重力控制或重力—强度过渡条件下针对锥形及曲面靶体的系统实验仍较为不足。DART 任务撞击 Didymos 双小行星系统伴星 Dimorphos 后，观测到明显的喷射幕结构，喷射锥张角远大于典型平面靶实验结果，说明非平坦表面、低重力和碎石堆结构可能共同改变喷射物运动和动量传递过程。

为揭示非平坦表面对成坑与喷射的影响，Yokota et al. [17] 以 120°顶角锥形石英砂靶体开展 1–4 km/s 超高速垂直撞击实验，用于类比小天体曲面地形下的成坑过程（图 33）。实验结果显示，相较于平坦靶体，锥形靶坑缘更浅，深径比明显降低；撞击后锥形靶顶部被削平，整体形态由圆锥向截顶圆锥转变。坑周不仅存在喷射物堆积，还存在坑下砂体向外位移形成的位移型坑缘，导致截顶宽度显著增加。锥形靶坑缘半径较平坦靶约减小 10%，且这种差异与撞击速度关系不明显，主要反映了地形几何边界对瞬态坑横向扩展的限制。该研究认为，锥形靶成坑过程仍可纳入 π 组相似律框架，但缩放系数需进行几何修正。



(a) Evolution of the ejecta curtain observed in the experiments

(b) Evolution of the ejecta curtain calculated using the Z-model ($Z = 2.75$, $L = 1.5$ mm)

图 33 锥形沙靶的超高速撞击喷射和 Maxwell Z 模型计算喷射演化对比^[17]
Fig. 33 Comparison of ejecta evolution between hypervelocity impact experiments on conical sand targets and calculations from the Maxwell Z model^[17]

锥形靶表面几何显著改变了喷射幕的形态和喷射方向。实验结果表明,在成坑完成时,锥形靶喷射幕边缘与水平面的夹角约为 $20^{\circ} - 30^{\circ}$,明显小于平坦干砂靶体中通常大于 45° 的喷射角,说明锥形表面使喷射物以更低角度向外扩展。与此同时,锥形靶形成的喷射幕开口角(两侧喷射幕的夹角)显著增大,实验测得其开口角多位于 $100^{\circ} - 150^{\circ}$ 之间,明显大于平坦靶体上小于 90° 的喷射幕开口角。喷射幕开口角在撞击早期快速增大,随后趋于稳定;在相同撞击速度条件下,成坑完成时间略短于平面靶。进一步地,将 Maxwell Z 模型应用于锥形靶几何后,可较好再现实验中喷射幕的不对称形态及开口角随时间的演化,表明经典流场模型在考虑靶面几何约束后,仍可用于近似描述非平坦靶面的喷射幕形成过程。

总体而言,斜坡、曲率和锥形靶研究表明,地形效应并非简单改变坑径大小,而是通过改变自由面边界、重力分量、坑壁稳定性和喷射物出射条件,系统影响成坑全过程。斜坡主要控制坑壁非对称坍塌和沿坡向形态拉伸;曲率主要增强自由面层裂并提高表现成坑效率;锥形或小天体曲面则限制瞬态坑横向扩展并改变喷射物方向。因此,复杂地形条件下的成坑相似律需要同时考虑局部坡度、曲率半径、撞击点位置、休止角和靶体材料等参数。现有研究仍多集中于简单坡面、单一曲率、顶端垂直撞击条件和简单的几何对称形状展开讨论,对于不对称撞击,比如侧向撞击还缺乏相关研究。

5.2 靶体分层结构的影响

除地形因素外,靶体物性和内部结构非均质性对撞击坑形态、喷射物运动和相似律参数同样具有重要影响^[20, 40, 137-141]。靶体非均质性可概括为成分不均、物性不均和结构不均三类:成分不均包括岩性和化学组成差异;物性不均包括强度、孔隙度、密度、摩擦系数、含水/含冰状态和热物性差异;结构不均包括层理、分层、节理、裂隙和断层等。这些因素常相互叠加,共同控制冲击波衰减、能量耗散、挖掘深度、坑壁坍塌和喷射物来源深度^[142]。

常见靶体类型包括:结晶岩、沉积岩、松散的多孔介质以及特殊介质。结晶岩类靶体,如月球高地斜长岩、地球花岗岩/玄武岩和石质小行星母岩,通常结构致密、颗粒胶结牢固,抗压和抗剪强度较高,撞击时易发生脆性破碎,并形成较陡坑壁和明显冲击变质效应。沉积岩类靶体,如砂岩、白云岩、泥岩和火星层状沉积物,常具有层理和较高孔隙度,撞击时易沿层理面滑脱和坍塌,形成较浅坑体、阶地和复杂坑壁结构。松散/多孔介质,如月球表岩屑、小行星碎石堆物质、砂层和冰碛物,通常无胶结或弱胶结,孔隙度较高,撞击时孔隙压实和颗粒重排会消耗大量冲击能量,使冲击波衰减加快,坑体尺寸和喷射物速度降低。特殊介质包括冰层、冰-岩混合介质、海洋覆盖层和火山熔岩流等,其挥发、熔融、流体回流和层间滑脱过程会进一步改变成坑与后期调整机制。

5.2.1 孔隙度、强度和摩擦性质

孔隙度是控制小天体、表岩屑和沉积靶体成坑机制的关键参数。Housen et al.^[57] 将耦合参数理论推广到高孔隙度天体，证实在高孔隙靶体中可出现压实主导成坑机制，并引入摩擦角和孔隙度等参数描述成坑效率。在高孔隙介质中，撞击能量不仅用于挖掘和喷射，还大量消耗于孔隙塌陷、颗粒破碎和不可逆压实过程。因此，相较于致密靶体，高孔隙靶体通常形成较小、较浅的坑体，喷射物速度和喷射质量降低，喷射毯发育受到抑制，部分喷射物易回落并充填坑内。

在垂直撞击条件下，考虑上述能量耗散机制，可在公式(1)的基础上引入靶体孔隙度 o 和摩擦参数 ϕ_f ，以表征二者对成坑效率的修正作用。此时，撞击坑体积 V 与撞击体质量、撞击速度、重力加速度、靶体密度、孔隙度及摩擦参数之间的相似律关系可表示为^[57]：

$$V = f \{a, U, \rho_p, g, \rho_t, Y, c_p, c_t, \eta, \Phi_f, o\} \quad (41)$$

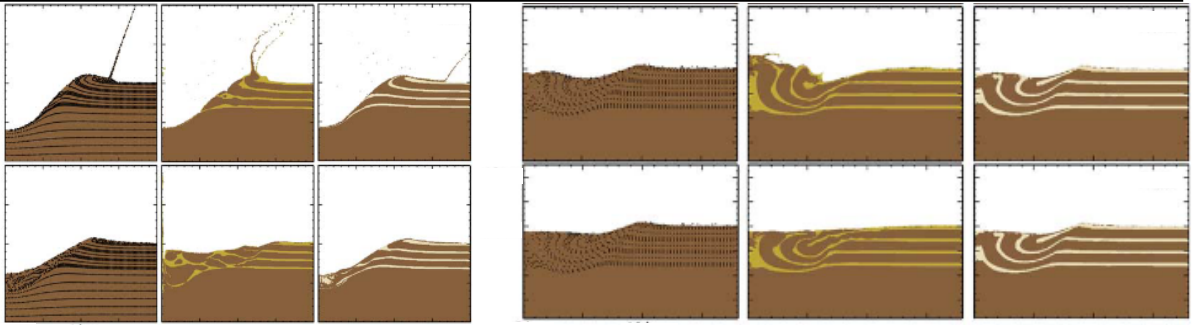
除孔隙度外，靶体强度和摩擦性质也显著控制坑体形态和喷射物运动。Poelchau et al.^[99] 进行了约 5 km/s 弹丸超高速撞击石英岩、凝灰岩、干砂岩和饱水砂岩等靶岩实验，发现最终撞击坑由瞬态坑和层裂区共同组成，其中层裂区体积占比可达 50% - 87%，是控制强度主导成坑效率的重要因素。孔隙度越高，层裂越弱；相同条件下，饱水砂岩层裂量远大于干砂岩；弹丸直径越大，靶体表现出的有效强度越低，层裂越剧烈，成坑效率越高。Luther et al.^[143] 系统研究靶体强度、摩擦和孔隙率对喷射运动的影响，发现靶体强度参数，尤其是摩擦系数和内聚力，对喷射物分布具有主要控制作用；相比之下，靶体孔隙度和大于 6 km/s 的撞击速度对喷射物运动的影响相对较小。Caldwell et al.^[144] 对行星 Psyche 上的大型撞击坑开展三维数值模拟，通过对比不同撞击角度、孔隙率和撞击速度工况，发现孔隙结构可通过孔隙坍塌吸收冲击能量，从而改变坑形，并推测斜撞击与孔隙共同作用可能导致更宽、更浅的成坑结果。

总体来看，孔隙度、强度和摩擦性质主要通过改变能量耗散和抗剪破坏方式影响成坑过程。高孔隙靶体强调压实和冲击衰减，高强度靶体强调层裂和脆性破坏，低强度或低摩擦靶体则更易发生坑壁坍塌和重力调整。因此，复杂靶体相似律不能仅以单一“靶体强度”参数表征，而应区分孔隙压实强度、抗拉强度、抗剪强度、摩擦角和破损后材料强度等不同物理量。

5.2.2 强弱分层与孔隙梯度结构

分层结构是太阳系行星和小天体表面普遍存在的特征^[145-149]。根据结构和物性差异，多层靶体大致可分为四类：（1）岩石强度分层，包括弱表层—强基底、强表层—弱基底和多层强弱交替结构^[150]；（2）孔隙梯度分层，如表层高孔隙—深部低孔隙和双层孔隙差异结构^[151]；（3）水—岩分层，如浅海或深海覆盖层^[152, 153]；（4）冰—岩分层，如冰盖、埋藏冰和碎屑覆盖冰体等^[154, 155]。分层结构可通过层间波阻抗差异、强度差异和密度差异影响冲击波反射/透射、稀疏波叠加、挖掘深度和坑壁滑塌路径。

Senft 和 Stewart^[150] 通过数值模拟比较了均质靶体、含弱层靶体和含强层靶体中简单坑与复杂坑的形成过程（图 34）。各分图中，i）表示均质玄武岩靶体，黑点为无质量拉格朗日示踪粒子；ii）表示含弱玄武岩层靶体；iii）表示含强玄武岩层靶体。结果显示，弱层对成坑形态具有显著影响，可导致双层喷射帘、阶梯状坑壁、更宽更浅的最终坑形态以及不规则中央峰；而强层影响相对较弱，通常仅轻微改变喷射角和局部结构，对最终坑径影响较小。在复杂坑形成过程中，弱层可降低坑壁稳定性，增强滑塌和阶地发育，使最终坑边缘模糊、坑底结构复杂；强层靶体则更接近均质靶体成坑结果。



(a) Simple craters in layered targets with different strengths ($L=100$ m, $U=17$ km/s; thin-layer thickness is 25 m, thick-layer thickness is 75 m)

(b) Complex craters in layered targets with different strengths ($L=1000$ m, $U=17$ km/s; thin-layer thickness is 250 m, thick-layer thickness is 750 m)

图 34 不同强度分层靶的简单坑和复杂坑撞击坑结构对比^[150]

Fig. 34 Structural comparison of simple and complex impact craters in layered targets with different strengths^[150]

弱风化层覆盖坚硬基岩的多层靶模拟表明，撞击坑最终形态与撞击坑直径 D 和风化层厚度 h 的比值密切相关^[150, 151, 156]。当 D/h 远小于 4 时，撞击坑呈现简单的碗状形态；当 D/h 介于 4 至 7.5 之间时，会形成中央丘；当 D/h 介于 8 至 10 之间时，会形成平坦坑底；当 D/h 远大于 10 时，会形成同心撞击坑形态。同心坑分为两类^[157]：挖掘型：撞击过程中直接形成（如 Lockne 坑）；坍塌型：撞击后上层弱层大规模塌陷形成（如切萨皮克湾坑、火星部分大坑）。Senft 和 Stewart^[150] 也指出，这些形态转变边界并非固定常数，而与层间强度差、密度差和波阻抗差有关，如图 35 所示。因此，撞击坑形态可作为反演行星表层厚度和力学分层的重要依据，但单一坑形往往具有多解性，需要结合地形、喷射物、矿物组成和地球物理资料共同约束。

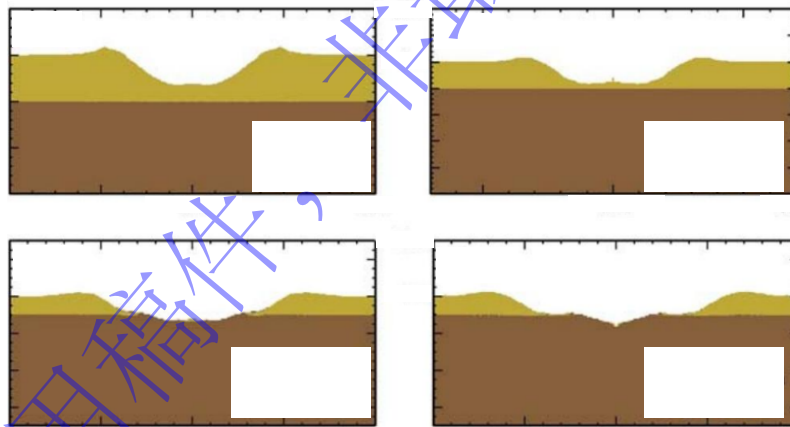


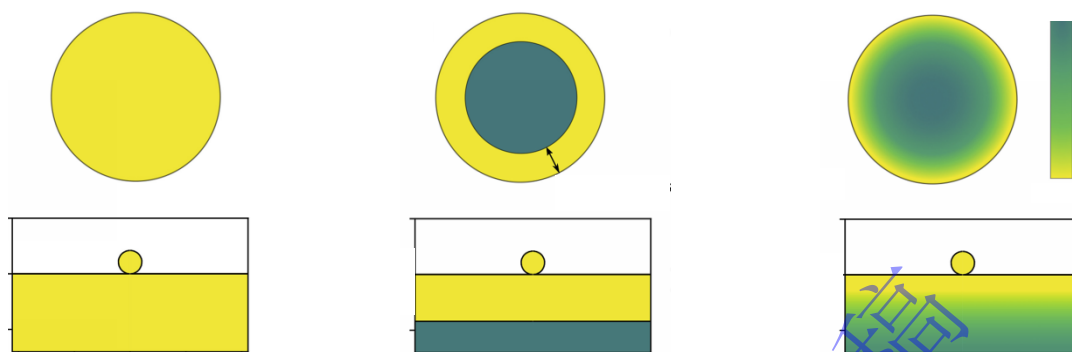
图 35 不同半径的玄武岩弹以 17 km/s 速度撞击具有 10 m 厚度风化层的坚硬基底形成的撞击坑结构^[150]

Fig. 35 Impact crater structures formed by basalt projectiles of varying radii striking a rigid basement covered by a 10 m-thick regolith layer at 17 km/s^[150]

除岩石强度分层外，无黏聚力颗粒材料中的密度和内摩擦角差异同样可控制坑形。Ormö^[39] 通过两层无黏聚力颗粒材料实验与数值模拟，控制粒度一致而改变密度和内摩擦角，发现分层靶体不仅在强度主导成坑中重要，在重力主导成坑中同样可以控制同心坑形成。该结果修正了同心坑仅由层间黏聚力或强度差异形成的认识，表明即使靶体无黏聚力，仅由层间密度、内摩擦角或波阻抗差异也可诱发典型同心坑结构。近期关于重力主导分层靶体的研究进一步表明，层间界面位置、上覆层厚度和层间阻抗差异会共同影响外环坑、嵌套坑和喷射物来源深度。

小行星和碎石堆天体中还普遍存在孔隙度随深度变化的梯度结构。Raducan et al.^[151] 针对靶体分层和孔隙度耦合如何影响撞击坑形态、喷射物质量和速度分布、动量增强因子展开分析，建立了如图 36 所示的模型，弹体为模拟 DART 探测器（310 kg, 0.84 m, 7 km/s）垂直撞击。模拟结果表明，对

975 于分层结构：表层厚度适中时，由于冲击波反射增强喷射，喷射质量最多可提升 30%；当表层极薄
976 时，基底强度抑制挖掘，喷射量减少。对于梯度孔隙度靶体，当孔隙度在地表下 6 m 内快速下降时，
977 才会显著提升喷射质量与动量；增强幅度最高约 25%，来源于深部致密物质的挤压抛射。



978 (a) Homogeneous porous half-space

(b) Layered target consisting of a weak, porous upper layer covering a stronger, less porous substrate

979 (c) Target with a continuous porosity gradient

图 36 均质、分层与连续孔隙梯度靶体模型^[151]

980 Fig. 36 Homogeneous, layered, and continuously graded porous target models^[151]

981 5.2.3 水/冰覆盖层与挥发分靶体

982 除固体分层靶外，天体表面还广泛存在水/冰覆盖层、埋藏冰和冰—岩混合介质。这类靶体不仅
983 改变冲击波传播和挖掘过程，还可能通过汽化、融化、流体回流、升华和后期塌陷持续改造最终坑形。
984

985
986 Lindström et al.^[152] 针对 Lockne 撞击坑形成过程开展研究，发现直径约 600 m 的小行星以
987 45°、15 km/s 撞击水深约 500 m 的靶体时，模拟成坑结果可与观测较好吻合（图 37）。撞击过程中，
988 喷射水层形成临时“水墙”，阻挡了大部分岩石喷射物，只有较大岩块能够突破并运移至远离坑缘的区
989 域。熔融体体积约为 0.5 km³，其中仅少部分喷出坑外并以碎砂形式沉积。该过程经历冲击波传播、
990 水体与岩石喷射幕相互作用、坑体坍塌、海水回涌和喷射物沉积等阶段，说明水层不仅影响挖掘和喷
991 射过程，也会控制沉积序列和后期回填结构。

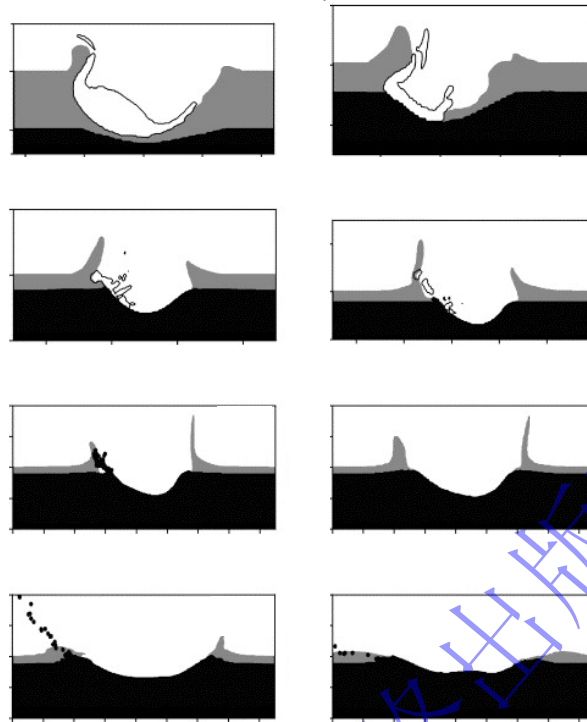


图 37 Lockne 撞击坑的形成过程^[152]

Fig. 37 Formation process of the Lockne impact crater^[152]

Range et al.^[153] 采用 iSALE-2D 冲击流体力学代码和海洋模块化模型第六版 (Modular Ocean Model version 6, MOM6) 及海啸分裂法模型 (Method of Splitting Tsunami, MOST), 模拟白垩纪末希克苏鲁伯撞击从成坑到全球海啸传播的全过程。初始阶段用 iSALE-2D 模拟撞击成坑、水体抬升与边缘波生成 (图 38), 随后将结果输入全球浅水波模型, 模拟距今约 66 Ma 古海洋中海啸的传播过程 (图 39)。研究表明, 希克苏鲁伯撞击引发的海啸能量远高于现代大型海啸事件, 初始浪高可达千米级, 主要能量来自喷射物驱动的边缘波, 而非坑体塌陷回流。该研究体现了水体覆盖层对撞击环境效应的放大作用, 也说明海洋撞击研究需要将成坑模拟与流体动力学模型耦合。

Sokołowska et al.^[155] 针对火星千米级简单撞击坑, 系统研究表层水 / 冰、埋藏冰、冰上碎屑盖层对撞击坑形态、喷射角度、速度、喷射物厚度分布与迁移率的控制作用。研究发现, 水/冰层越厚, 撞击坑越宽、越深; 挥发物消失后, 坑更浅、更窄。多层结构可导致阶梯状坑壁, 瞬态阶地会在塌陷中消失, 但冰升华后可能重新形成阶地, 因此阶地并不一定代表原始材料界面, 而可能是后期挥发物损失的标志。水/冰层使喷射角升高、喷射速度降低, 喷射范围显著减小。对于纯水/冰层结构, 喷射物厚度可近似服从幂律衰减; 而对于碎屑—冰—玄武岩三层结构, 喷射物厚度会偏离幂律衰减规律, 可作为识别地下冰的潜在标志。喷射物混合、幂律偏离、迁移率降低和厚度峰值偏移, 均可作为反演火星地下冰分布提供约束。

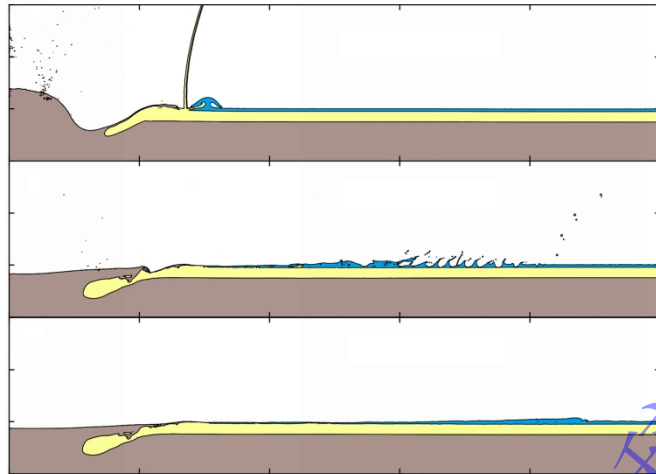


图 38 iSALE-2D 模拟的希克苏鲁伯撞击过程^[153]
Fig. 38 Chicxulub impact process simulated by iSALE-2D^[153]

总体而言，靶体物性、分层结构非均质性共同表明，自然靶体并不能简单视为均质连续介质。孔隙度控制压实和能量耗散，强度和摩擦控制坑壁稳定性，分层结构控制冲击波反射和挖掘深度，挥发分控制喷射物迁移和后期改造。在上述因素作用下，挖掘深度、喷射物来源和坑底结构发生改变，可诱发同心坑、阶地和双层喷射帘；含水/冰层则可能通过汽化、融化、流体回流和升华改造影响喷射物迁移率和最终坑形。

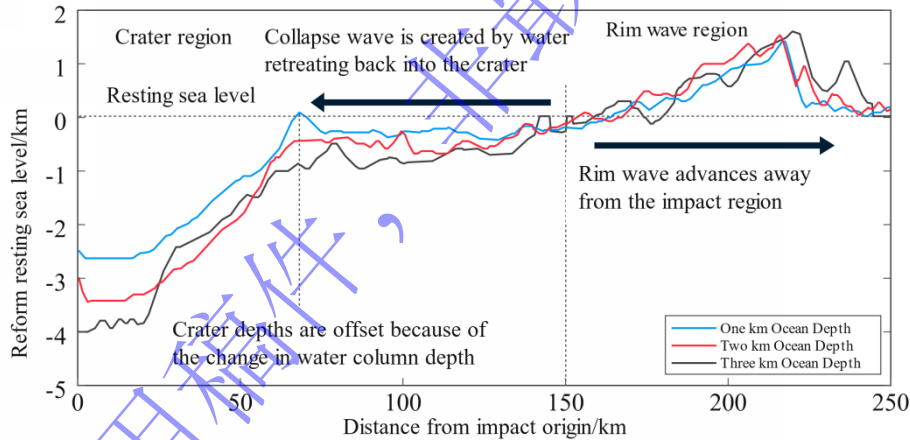


图 39 iSALE-2D 模拟不同海水深度下的波形与坑形^[153]
Fig. 39 Waveform and crater shape for three different runs from the iSALE-2D hydrocode^[153]

5.3 靶体节理性特征的影响

除地形和分层外，节理、裂隙、断层和层理面等先存构造弱面对撞击坑形态也具有重要控制作用。天体表面广泛存在多边形撞击坑和方形撞击坑，其直边和角点往往反映靶体内部优势弱面方向，而不一定是撞击角度单独作用的结果（图 40）。节理和断裂可改变冲击波散射、材料破碎路径、坑壁坍塌方式和坑缘抬升差异，使最终坑形呈现多边形、不规则或方向性坍塌特征^[158]。

ÖHMAN et al.^[20] 对火星阿尔盖尔盆地周边 269 个不同降解阶段的多边形撞击坑进行观测分析，认为撞击坑缘的多边形形态不是后期降解形成的，而是成坑过程中形成的。多边形撞击坑的直边走向反映靶体区域先存断裂或节理系统，并与成坑阶段密切相关。对于简单坑，形态可能在挖掘阶段形成，挖掘流沿节理方向更高效，直边与节理之间可能呈一定夹角；对于复杂坑，多边形形态多在调整阶段形成，坑缘沿节理或断裂面发生坍塌，直边通常与节理方向近似平行^[141]。阿尔盖尔盆地的多边形坑

以复杂坑为主（直径 10-35 km），其形态主要由坍塌调整阶段靶体弱面控制。只有当靶体存在优势方向的构造弱面，且节理间距与坑径尺度匹配时，才容易形成多边形坑；若断裂方向杂乱或无明显弱面，最终坑形仍可能近似圆形^[20]。

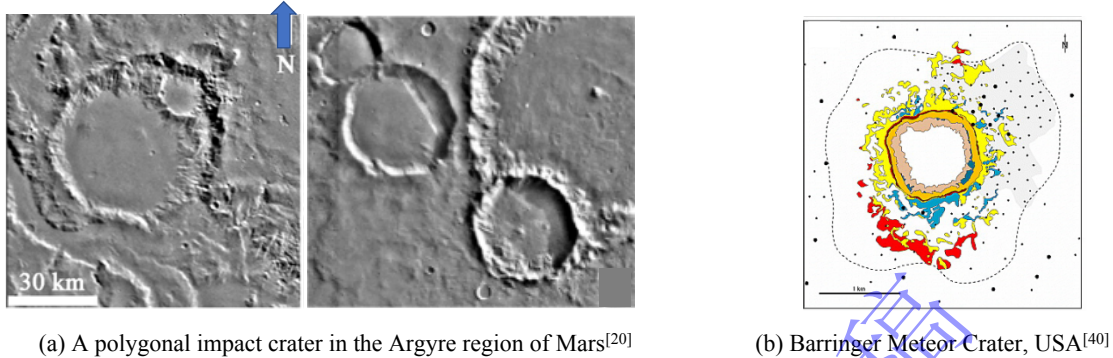
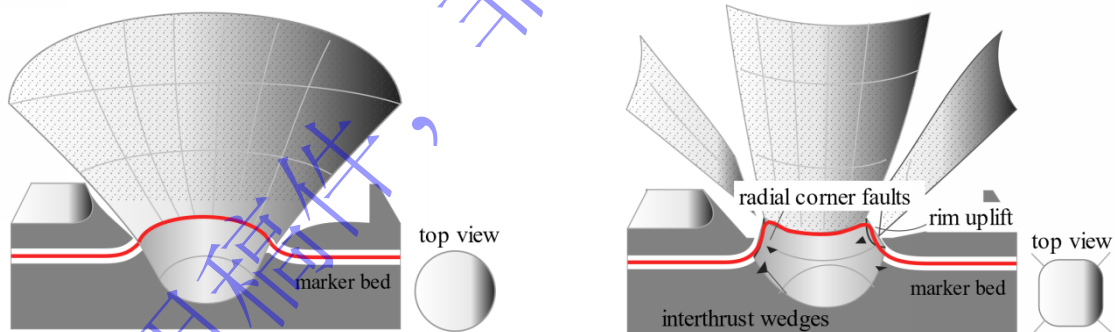


图 40 天体多边形撞击坑
Fig. 40 Polyagonal impact craters on planetary bodies

Poelchau et al. ^[40]以巴林杰撞击坑为例，通过实地测量和构建力学模型（图 41），量化了靶体非均质性对抗形、坑缘抬升的控制，同时探究了斜撞击的影响。研究指出，巴林杰撞击坑的方形轮廓与区域节理组密切相关，节理方向与坑体方形轮廓的对角线相对应，并控制大范围垂直断层和坑缘差异抬升的发育。该研究强调，撞击角度和靶体非均质性在成坑不同阶段的作用不同：在接触压缩和挖掘早期，撞击角度主导冲击波初始传播方向和远端喷射物不对称性；随着冲击波衰减，应力水平逐渐接近靶体岩石强度，节理、层理和断层等靶体非均质性开始主导挖掘流路径、坑壁破裂、逆冲楔发育和坑缘差异抬升。斜撞击特征主要反映在远端喷射物的不对称性中，而靶体构造非均质性则主要体现在近端喷射物、坑缘构造和坑壁破裂模式中。



(a) A homogenous target resulting in a circular crater shape (b) A target with perpendicular zones of weakness
图 41 均质和非均质靶体的成坑过程对比^[40]

Fig. 41 Comparison of crater formation processes in homogeneous and heterogeneous targets^[40]

因此，靶体先存构造非均质性可以控制破裂与坍塌路径，是同心坑、多边形坑、方形坑和其他非圆形坑体形成的重要原因之一。区域构造格局决定坑缘直边的优势走向，节理/断裂的方向、间距、密度和连通性决定坑体多边形类型及其保存程度。对于复杂坑，调整阶段的重力坍塌和坑缘滑移更容易放大弱面效应；对于简单坑，弱面更多影响挖掘流效率和局部坑缘形态。由此可见，非圆形撞击坑不能简单归因于斜撞击，也需要结合靶体构造背景、喷射物分布和地形保存状态综合判断。

总体来看，复杂靶区条件并非以单一因素独立作用，而是通过与撞击角度、撞击速度和重力环境等参数耦合，共同影响成坑过程。因此，如何在实验、数值模拟和相似律理论中更准确地表征复杂靶区的多参数耦合效应，仍是后续研究需要进一步解决的关键问题。

6 总结与展望

本文围绕撞击体斜撞击及其与复杂靶区条件耦合作用下的成坑过程,系统梳理了实验室撞击实验、数值模拟、经典成坑相似律和喷射物运动理论的研究进展,重点归纳了撞击角度、地形起伏、靶体结构与物性差异等复杂因素对抗体形态、喷射物分布和能量耦合过程的影响。

相对于主要介绍经典成坑模型或特定靶体的已有综述,相关研究被进一步按撞击角度、地形及靶体物性与结构条件加以归纳,补充了这些复杂条件下成坑过程、喷射物分布和相似律适用性的讨论。其中,喷射物运动理论按照产生机制加以梳理,撞击角修正关系的靶体条件、参数范围及局限性在4.4节进行了讨论,简单坑—复杂坑转变判据向斜撞击条件推广时的不确定性得到明确。综合现有研究可以得到以下认识。首先,撞击角度、地形边界和靶体异质性虽然对应不同的初始条件,但其影响最终均通过改变冲击波传播、能量耗散与空间分配、残余速度与挖掘流场以及后期坑壁稳定性等关键过程体现,因此不同复杂因素之间具有共同的动力学作用环节。其次,不同复杂因素对成坑不同阶段的敏感性并不相同:撞击角度主要引入显著的方位非对称性,坡度和曲率进一步改变接触边界与重力驱动的后期调整,而孔隙、分层及结构面则更直接影响冲击衰减、压实耗能、波的反射透射和破坏路径。因而,多种复杂因素共同存在时,其作用通常不能简单表示为若干独立修正项的线性叠加。再次,现有定量关系具有明显的条件依赖性。撞击角修正指数随靶体材料、摩擦性质和成坑机制变化,复杂靶体条件下经典相似律的适用边界也尚不明确;类似地,简单坑—复杂坑转变的 S_{crit} 判据主要基于垂直撞击条件标定,斜撞击条件下撞击角通过改变 d_{max} 及坑体方位非对称性影响最终形态,目前只能据此讨论可能的变化趋势,尚不能直接将垂直撞击的临界值作为定量分类阈值。

多因素耦合作用仍是现有研究的薄弱环节。斜撞击与坡面地形、孔隙与分层结构以及节理与坑壁坍塌之间已出现两因素耦合研究,但其参数覆盖和尺度范围仍有限。未来需要在明确单因素规律及其适用条件的基础上,逐步开展耦合条件下的系统实验和三维数值模拟,并借助自然撞击坑观测检验这些结果的可推广性。

尽管现有研究已显著拓展了对斜撞击和复杂靶体成坑机制的认识,但距离建立普适、精准、可外推的复杂撞击成坑理论仍存在若干不足。(1)实验条件与自然撞击之间仍存在明显尺度差异,实验室撞击难以同时满足真实天体中的高速度、大尺度和特定重力环境,尤其难以完整再现强冲击波、熔融汽化、弹体破碎和大尺度重力坍塌过程。(2)靶体模型较简化。多数实验和数值模拟采用均质、理想双层、三层或均质孔隙模型,难以代表真实行星表层中的多层互层、孔隙度梯度、强度梯度、压实风化层、层理倾角以及断层—节理等复杂结构。(3)多因素耦合研究仍不足。现有研究多分别讨论坡度、曲率、孔隙度、分层或节理等单一因素,缺少斜撞击—复杂地形—分层靶体—节理结构—孔隙度共同作用下的系统实验和高分辨率三维模拟。(4)复杂撞击条件下的相似律及其尺度外推存在不确定性。现有相似律多基于平坦、均质或单一因素的撞击实验得到,而真实行星尺度撞击又同时受重力、材料强度、热力学过程和靶体结构控制,目前尚缺少能够同时纳入上述复杂条件的统一无量纲相似律模型。(5)材料本构模型和参数选择依据不充分。数值模拟所需的强度、摩擦、损伤、孔隙压实和热力学参数多来源于实验室理想材料,而行星表层材料的原位探测数据、样品分析结果和实验校准资料仍有限,导致模拟结果在不同靶体类型和不同尺度条件下的可比性与可靠性仍需进一步提高。(6)撞击坑形态反演具有多解性,坑径、深径比、喷射物分布和冲击变质特征均可能受到撞击角度、靶体性质和后期改造的共同影响,仅依赖单一形态指标难以准确判断撞击能量、入射角度或地下结构。(7)极端场景下的成坑机制有待系统研究,如极斜撞击、低/微重力环境、超多孔碎石堆靶体、高含水或含冰靶体、复杂山地地形以及小天体曲面等。

基于上述问题,未来研究可从以下几个方面展开。

(1)建立面向复杂撞击条件的系统参数化实验与三维数值模拟体系。在提高撞击速度、弹丸尺度和瞬态诊断能力的基础上,应采用系统参数设计控制撞击角度、坡度、曲率、孔隙度、层厚比、强

1103 度比和层理面取向等变量,并结合高速摄影、X射线成像、数字图像相关、粒子图像测速和冲击压力
1104 诊断等手段,同时获取冲击传播、喷射物运动、瞬态坑生长和后期坍塌信息。数值模拟则应进一步发
1105 展三维高分辨率和多物理场模型,对孔隙压实、损伤演化、摩擦弱化、热软化、熔融汽化及颗粒运动
1106 等过程进行更加可靠的描述,从而形成实验与模拟相互约束的数据体系。

1107 (2) 加强复杂靶体参数表征及材料模型标定。未来需要由理想双层、均质孔隙模型逐步向多层、
1108 孔隙度和强度梯度、倾斜层理及节理断层等真实地质结构扩展,并结合深空探测原位数据、返回样品
1109 测试和地球类比材料实验,对强度、摩擦、损伤、孔隙压实和热力学参数进行约束。相比单纯增加模
1110 型复杂程度,更重要的是建立一套可比较、量化的复杂靶体特征参数,为不同实验、模拟和天然撞
1111 击坑之间的比较提供共同基础。

1112 (3) 发展具有明确适用边界的多参数成坑相似律和形态转变判据。与其直接寻求一个能够覆盖
1113 全部复杂条件的统一公式,更现实的路径是由单因素修正向两因素耦合和多因素参数化逐步推进,明
1114 确撞击角、坡角、曲率、孔隙度、层厚比、强度比、波阻抗比及节理尺度等无量纲参数对抗径、坑深、
1115 坑体积和喷射物特征的贡献及适用区间。对于简单坑—复杂坑转变,现有判据主要建立于垂直撞击条
1116 件,未来应通过不同撞击角度下的系统三维模拟、实验及天然撞击坑观测,对 $d_{\max}$ 、 S 与最终坑形态
1117 之间的关系进行联合标定,并检验 S_{crit} 是否具有撞击角依赖性;在此基础上结合坑壁坍塌程度、阶梯
1118 状构造、中央隆起及深径比等形态指标,建立适用于斜撞击条件的形态转变判据。

1119 (4) 完善喷射物运动理论与动量传递模型。喷射物运动是连接成坑过程、地表改造和小天体防
1120 御的重要环节。未来应在传统喷射模型基础上,进一步考虑斜撞击及复杂靶区条件对喷射物运动的影
1121 响。尤其是在 DART 类小天体偏转任务中,喷射物动量对小天体轨道改变具有关键作用,因此需要
1122 建立适用于低重力、多孔、碎石堆靶体的喷射物动量传递模型。

1123 (5) 拓展极端撞击条件和特殊天体环境研究。未来应加强极斜撞击、极低角度掠射撞击、低/微
1124 重力环境、无大气环境、超多孔介质、高含水靶体、纯冰靶体和冰—岩混合靶体等极端条件下的成坑
1125 机制研究。同时,应关注复杂地形条件,如陡峭斜坡、峡谷、山脊、坑缘、曲面小天体表面和多撞击
1126 坑叠置区对成坑过程的影响。通过拓展这些极端场景研究,可更全面地覆盖太阳系天体表面的真实撞
1127 击条件。

1128 总体而言,撞击体斜撞击及复杂靶区条件下的成坑研究正在从理想化单因素模型向真实天体环境
1129 下的多因素耦合模型发展。通过实验、三维多物理场模拟和天体观测之间的闭环验证,逐步建立具有
1130 明确物理含义和适用范围的复杂撞击成坑模型,将有助于提高对自然撞击坑形成过程、撞击参数反演
1131 及小天体动能撞击效应的定量认识。

1132

1133 致谢 本文得到国家自然科学基金(12372346、12432018)和创新群体项目(12221002)的支持。

1134

1135 参考文献

- 1136 [1] OSINSKI G R, GRIEVE R A F, FERRIÈRE L, et al. Impact Earth: A review of the terrestrial impact record [J]. Earth-
1137 Science Reviews, 2022, 232: 104112. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104112.
1138 [2] SCHULTZ P H. Atmospheric effects on ejecta emplacement and crater formation on Venus from Magellan [J]. Journal of
1139 Geophysical Research: Planets, 1992, 97(E10): 16183-16248. DOI: 10.1029/92JE01508.
1140 [3] SCHULTE P, ALEGRET L, ARENILLAS I, et al. The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-
1141 Paleogene Boundary [J]. Science, 2010, 327(5970): 1214-1218. DOI: 10.1126/science.1177265.
1142 [4] KRING D A. Environmental consequences of impact cratering events as a function of ambient conditions on Earth [J].
1143 Astrobiology, 2003, 3(1): 133-152. DOI: 10.1089/153110703321632471.
1144 [5] QUANTIN-NATAF C, CRADDOCK R A, DUBUFFET F, et al. Decline of crater obliteration rates during early martian
1145 history [J]. Icarus, 2019, 317: 427-433. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.08.005.
1146 [6] MELOSH H J. Impact cratering: a geologic process [M]. New York: Oxford University Press, 1989.
1147 [7] HOLSAPPLE K A, SCHMIDT R M. Point source solutions and coupling parameters in cratering mechanics [J]. Journal of
1148 Geophysical Research: Solid Earth, 1987, 92(B7): 6350-6376. DOI: 10.1029/JB092iB07p06350.

- 1149 [8] GAULT D E, COLLINS R J, GOLD T, et al. Lunar theory and processes [J]. *Journal of Geophysical Research* (1896-1977),
1150 1968, 73(12): 4115-4131. DOI: 10.1029/JB073i012p04115.
- 1151 [9] MAXWELL D E. Simple Z model of cratering, ejection, and the overturned flap [M]//RODDY D J, PEPIN R O, MERRILL
1152 R B, eds. *Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications*. New York: Pergamon Press, 1977: 1003-
1153 1008.
- 1154 [10] HOLSAPPLE K A, SCHMIDT R M. On the scaling of crater dimensions: 1. Explosive processes [J]. *Journal of Geophysical*
1155 *Research: Solid Earth*, 1980, 85(B12): 7247-7256. DOI: 10.1029/JB085iB12p07247.
- 1156 [11] HOLSAPPLE K A, SCHMIDT R M. On the scaling of crater dimensions: 2. Impact processes [J]. *Journal of Geophysical*
1157 *Research: Solid Earth*, 1982, 87(B3): 1849-1870. DOI: 10.1029/JB087iB03p01849.
- 1158 [12] HOUSEN K R, SCHMIDT R M, HOLSAPPLE K A. Crater ejecta scaling laws: Fundamental forms based on dimensional
1159 analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88(B3): 2485-2499. DOI: 10.1029/JB088iB03p02485.
- 1160 [13] KENKMANN T, DEUTSCH A, THOMA K, et al. Experimental impact cratering: A summary of the major results of the
1161 MEMIN research unit [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2018, 53(8): 1543-1568. DOI: 10.1111/maps.13048.
- 1162 [14] PIERAZZO E, MELOSH H J. Understanding oblique impacts from experiments, observations, and modeling [J]. *Annual*
1163 *Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 141-167. DOI: 10.1146/annurev.earth.28.1.141.
- 1164 [15] SCHULTZ P H, ANDERSON R R. Asymmetry of the Manson impact structure: evidence for impact angle and direction
1165 [M]//KOEHLER C, ANDERSON R R, eds. *The Manson Impact Structure, Iowa: Anatomy of an Impact Crater*. Boulder:
1166 Geological Society of America, 1996: 397-417. DOI: 10.1130/0-8137-2302-7.397.
- 1167 [16] ANDERSON J L B, SCHULTZ P H, HEINECK J T. Asymmetry of ejecta flow during oblique impacts using three-
1168 dimensional particle image velocimetry [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, 108(E8): 5094. DOI:
1169 10.1029/2003JE002075.
- 1170 [17] YOKOTA Y, ARAKAWA M, YASUI M, et al. Effects of surface topography on the crater formation process of rubble-
1171 pile asteroids [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 202: 105325. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2025.105325.
- 1172 [18] ASCHAUER J, KENKMANN T. Impact cratering on slopes [J]. *Icarus*, 2017, 290: 89-95. DOI:
1173 10.1016/j.icarus.2017.02.021.
- 1174 [19] OSINSKI G R, SILBER E A, CLAYTON J, et al. Transitional impact craters on the Moon: Insight into the effect of target
1175 lithology on the impact cratering process [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2019, 54(3): 573-591. DOI:
1176 10.1111/maps.13226.
- 1177 [20] ÖHMAN T, AITTOLA M, KOSTAMA V P, et al. Polygonal impact craters in the Argyre region, Mars: Evidence for
1178 influence of target structure on the final crater morphology [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2006, 41(8): 1163-1173.
1179 DOI: 10.1111/j.1945-5100.2006.tb00513.x.
- 1180 [21] TAKIZAWA S, KATSURAGI H. Scaling laws for the oblique impact cratering on an inclined granular surface [J]. *Icarus*,
1181 2020, 335: 113409. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.113409.
- 1182 [22] PIERAZZO E, MELOSH H J. Melt Production in Oblique Impacts [J]. *Icarus*, 2000, 145: 252-261. DOI:
1183 10.1006/icar.1999.6332.
- 1184 [23] WAKITA S, GENDA H, KUROSAWA K, et al. Effect of Impact Velocity and Angle on Deformational Heating and
1185 Postimpact Temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(8): e2022JE007266. DOI:
1186 10.1029/2022JE007266.
- 1187 [24] MA J T, LV H, HE Q G, et al. Analysis of the contact compression stage and ejecta motion in oblique impact cratering of
1188 meteorites [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 206: 105413. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2025.105413.
- 1189 [25] SHUVALOV V. Ejecta deposition after oblique impacts: An influence of impact scale [J]. *Meteoritics & Planetary Science*,
1190 2011, 46(11): 1713-1718. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2011.01259.x.
- 1191 [26] GAULT D E, WEDEKIND J A. Experimental studies of oblique impact [C]//*Proceedings of the 9th Lunar and Planetary*
1192 *Science Conference*. Vol. 3. New York: Pergamon Press, 1978: 3843-3875.
- 1193 [27] BART G D, MELOSH H J. Distributions of boulders ejected from lunar craters [J]. *Icarus*, 2010, 209(2): 337-357. DOI:
1194 10.1016/j.icarus.2010.05.023.
- 1195 [28] RADUCAN S D, DAVISON T M, COLLINS G S. Ejecta distribution and momentum transfer from oblique impacts on
1196 asteroid surfaces [J]. *Icarus*, 2022, 374: 114793. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114793.
- 1197 [29] LUO X Z, ZHU M H, DING M. Ejecta Pattern of Oblique Impacts on the Moon From Numerical Simulations [J]. *Journal*
1198 *of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(11): e2022JE007333. DOI: 10.1029/2022JE007333.
- 1199 [30] LIU W J, ZHANG Q M, LONG R R, et al. Ejecta velocity and motion model of spherical aluminum alloy projectile
1200 hypervelocity impact on basalt [J]. *Acta Astronautica*, 2024, 224: 574-592. DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.08.051.
- 1201 [31] ANDERSON J L B, SCHULTZ P H, HEINECK J T. Experimental ejection angles for oblique impacts: Implications for
1202 the subsurface flow-field [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2004, 39(2): 303-320. DOI: 10.1111/j.1945-
1203 5100.2004.tb00342.x.
- 1204 [32] ELBESHAUSEN D, WÜNNEMANN K, COLLINS G S. The transition from circular to elliptical impact craters [J]. *Journal*
1205 *of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(11): 2295-2309. DOI: 10.1002/2013JE004477.
- 1206 [33] YIN F, CHEN M, YANG W G, et al. Discovery of the Hailin impact crater in northeast China [J]. *Matter and Radiation at*
1207 *Extremes*, 2025, 10(1): 013001. DOI: 10.1063/5.0236993.
- 1208 [34] CHANDNANI M, HERRICK R R. Influence of Target Properties on Wall Slumping in Lunar Impact Craters Within the
1209 Simple-To-Complex Transition [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128(1): e2022JE007369. DOI:
1210 10.1029/2022JE007369.
- 1211 [35] KROHN K, JAUMANN R, ELBESHAUSEN D, et al. Asymmetric craters on Vesta: Impact on sloping surfaces [J].
1212 *Planetary and Space Science*, 2014, 103: 36-56. DOI: 10.1016/j.pss.2014.04.011.
- 1213 [36] PRIEUR N C, ROLF T, LUTHER R, et al. The effect of target properties on transient crater scaling for simple craters [J].

- Journal of Geophysical Research: Planets, 2017, 122(8): 1704-1726. DOI: 10.1002/2017JE005283.
- [37] CLINE C J II, CINTALA M J. The effects of target density, porosity, and friction on impact crater morphometry: Exploratory experimentation using various granular materials [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2022, 57(7): 1441-1459. DOI: 10.1111/maps.13886.
- [38] ZHU M H, WÜNNEMANN K, POTTER R W K. Numerical modeling of the ejecta distribution and formation of the Orientale basin on the Moon [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(12): 2118-2134. DOI: 10.1002/2015JE004827.
- [39] ORMÖ J, RADUCAN S D, HOUSEN K R, et al. Effect of Target Layering in Gravity-Dominated Cratering in Nature, Experiments, and Numerical Simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, 129(5): e2023JE008110. DOI: 10.1029/2023JE008110.
- [40] POELCHAU M H, KENKMANN T, KRING D A. Rim uplift and crater shape in Meteor Crater: effects of target heterogeneities and trajectory obliquity [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E1): E01006. DOI: 10.1029/2008JE003235.
- [41] 刘文近, 张庆明, 马晓荷, 等. 近地小天体对地撞击成坑模型研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(12): 121404. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0255.
- LIU W J, ZHANG Q M, MA X H, et al. A review of the models of near-Earth object impact cratering on Earth [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(12): 121404. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0255. (in Chinese)
- [42] LV H, HE Q G, CHEN X W. Experimental and Numerical Advances in Planetary Cratering Impacts [J]. *Mechanics of Solids*, 2024, 59(4): 2322-2365. DOI: 10.1134/S0025654424604427.
- [43] HERRMANN W, WILBECK J S. Review of hypervelocity penetration theories [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, 5(1-4): 307-322. DOI: 10.1016/0734-743X(87)90048-0.
- [44] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- ZHANG Q M, HUANG F L. *Introduction to Hypervelocity Impact Dynamics* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [45] HOLSAPPLE K A. The Scaling of Impact Processes in Planetary Sciences [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21: 333-373. DOI: 10.1146/annurev.earth.21.050193.002001.
- [46] 刘文近, 张庆明, 龙仁荣, 等. 动能撞击偏转近地小天体研究进展 [J]. *宇航学报*, 2023, 44(1): 9-24. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.01.002.
- LIU W J, ZHANG Q M, LONG R R, et al. Review of kinetic impact deflection of near-Earth objects [J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(1): 9-24. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.01.002. (in Chinese)
- [47] KENKMANN T, POELCHAU M H, WULF G. Structural geology of impact craters [J]. *Journal of Structural Geology*, 2014, 62: 156-182. DOI: 10.1016/j.jsg.2014.01.015.
- [48] TIAN H C, ZHANG C, LI W J, et al. Isotopic evidence for volatile loss driven by South Pole-Aitken basin-forming impact [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2026, 123(3): e2515408123. DOI: 10.1073/pnas.2515408123.
- [49] DYPVIK H, JANSÁ L F. Sedimentary signatures and processes during marine bolide impacts: a review [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 161(3-4): 309-337. DOI: 10.1016/S0037-0738(03)00135-0.
- [50] DYPVIK H, BURCHELL M J, CLAEYS P. Impacts into marine and icy environments: a short review [M]//DYPVIK H, BURCHELL M J, CLAEYS P, eds. *Cratering in Marine Environments and on Ice*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004: 1-20. DOI: 10.1007/978-3-662-06423-8_1.
- [51] LELIWA-KOPYSTYNSKI J, BURCHELL M J. Impact cratering of icy and rocky targets in planetary sciences and in the laboratory [M]//DYPVIK H, BURCHELL M J, CLAEYS P, eds. *Cratering in Marine Environments and on Ice*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004: 223-249. DOI: 10.1007/978-3-662-06423-8_13.
- [52] NAKAMURA A M. Impact cratering on porous targets in the strength regime [J]. *Planetary and Space Science*, 2017, 149: 5-13. DOI: 10.1016/j.pss.2017.09.001.
- [53] 张鸿宇, 迟润强, 孙淼, 等. 颗粒靶体撞击溅射行为研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(12): 121101. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0153.
- ZHANG H Y, CHI R Q, SUN M, et al. Research progress on impact ejecting behavior of granular targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(12): 121101. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0153. (in Chinese)
- [54] BARLOW N G. A review of Martian impact crater ejecta structures and their implications for target properties [M]//KENKMANN T, HÖRZ F, DEUTSCH A, eds. *Large Meteorite Impacts III*. Boulder: Geological Society of America, 2005: 433-442. DOI: 10.1130/0-8137-2384-1.433.
- [55] LV H, HE Q G, CHEN X W. Theoretical and Numerical Study on a Scale Model Test of Planetary Cratering Impact [J]. *Aerospace*, 2025, 12(4): 333. DOI: 10.3390/aerospace12040333.
- [56] WÜNNEMANN K, ZHU M H, STÖFFLER D. Impacts into quartz sand: Crater formation, shock metamorphism, and ejecta distribution in laboratory experiments and numerical models [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2016, 51(10): 1762-1794. DOI: 10.1111/maps.12710.
- [57] HOUSEN K R, SWEET W J, HOLSAPPLE K A. Impacts into porous asteroids [J]. *Icarus*, 2018, 300: 72-96. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.08.019.
- [58] SUÁREZ-CORTÉS Á D, FLANDES A, DURAND-MANTEROLA H J. Planetary impact craters study through low-speed laboratory experiments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 156: 103954. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103954.
- [59] SCHMIDT R M. Meteor Crater: energy of formation: implications of centrifuge scaling [C]//*Proceedings of the 11th Lunar and Planetary Science Conference*. New York: Pergamon Press, 1980, 3: 2099-2128.
- [60] SCHMIDT R M, HOUSEN K R. Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering [J]. *International*

- Journal of Impact Engineering, 1987, 5(1-4): 543-560. DOI: 10.1016/0734-743X(87)90069-8.
- [61] COLLINS G S, MELOSH H J, MARCUS R A. Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth [J]. Meteoritics & Planetary Science, 2005, 40(6): 817-840. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2005.tb00157.x.
- [62] SCHMIDT R M, HOLSAPPLE K A. Theory and experiments on centrifuge cratering [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1980, 85(B1): 235-252. DOI: 10.1029/JB085iB01p00235.
- [63] KUROSAWA K, TAKADA S. Impact cratering mechanics: A forward approach to predicting ejecta velocity distribution and transient crater radii [J]. Icarus, 2019, 317: 135-147. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.06.021.
- [64] MELOSH H J. Impact cratering mechanics: Relationship between the shock wave and excavation flow [J]. Icarus, 1985, 62(2): 339-343. DOI: 10.1016/0019-1035(85)90129-0.
- [65] AMSDEN A A, RUPPEL H M, HIRT C W. SALE: a simplified ALE computer program for fluid flow at all speeds [R]. Los Alamos: Los Alamos Scientific Laboratory, 1980: 1-106. Report No. LA-8095. DOI: 10.2172/5176006.
- [66] OKAMOTO T, KUROSAWA K, GENDA H, et al. Impact Ejecta Near the Impact Point Observed Using Ultra-high-Speed Imaging and SPH Simulations and a Comparison of the Two Methods [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2020, 125(4): e2019JE005943. DOI: 10.1029/2019JE005943.
- [67] CITRON R I, STEWART S T. Large Impacts onto the Early Earth: Planetary Sterilization and Iron Delivery [J]. The Planetary Science Journal, 2022, 3(5): 116. DOI: 10.3847/PSJ/ac66e8.
- [68] GENDA H, KOKUBO E, IDA S. Merging criteria for giant impacts of protoplanets [J]. The Astrophysical Journal, 2012, 744(2): 137. DOI: 10.1088/0004-637X/744/2/137.
- [69] HYODO R, GENDA H. Escape and Accretion by Cratering Impacts: Formulation of Scaling Relations for High-speed Ejecta [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 898(1): 30. DOI: 10.3847/1538-4357/ab9897.
- [70] KUROSAWA K, OKAMOTO T, GENDA H. Hydrocode modeling of the spallation process during hypervelocity impacts: Implications for the ejection of Martian meteorites [J]. Icarus, 2018, 301: 219-234. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.09.015.
- [71] HAN P, HE Q, CHEN X, et al. Numerical Study on Asteroid Deflection by Penetrating Explosion Based on Single-Material ALE Method and FE-SPH Adaptive Method [J]. Aerospace, 2023, 10(5): 479. DOI: 10.3390/aerospace10050479.
- [72] HE Q G, CHEN X W, CHEN J F. Finite element-smoothed particle hydrodynamics adaptive method in simulating debris cloud [J]. Acta Astronautica, 2020, 175: 99-117. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.05.056.
- [73] LV H, HE Q G, CHEN X W, et al. Numerical simulation of impact crater formation and distribution of high-pressure polymorphs [J]. Acta Astronautica, 2023, 203: 169-186. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.11.048.
- [74] WU C Y, CHEN X W, HE Q G. Study on damage mechanism and damage distribution of the rear plate under impact of debris cloud [J]. Defence Technology, 2024, 35: 151-167. DOI: 10.1016/j.dt.2024.01.005.
- [75] YIN Z Y, CHEN X W. Numerical study on the dynamic fracture of explosively driven cylindrical shells [J]. Defence Technology, 2023, 27: 154-168. DOI: 10.1016/j.dt.2022.08.007.
- [76] COLLINS G S, MELOSH H J, OSINSKI G R. The impact-cratering process [J]. Elements, 2012, 8(1): 25-30. DOI: 10.2113/gselements.8.1.25.
- [77] TORNABENE L L, OSINSKI G R, MCEWEN A S, et al. Widespread crater-related pitted materials on Mars: Further evidence for the role of target volatiles during the impact process [J]. Icarus, 2012, 220(2): 348-368. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.05.022.
- [78] ANG J A. Impact flash jet initiation phenomenology [J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 10(1-4): 23-33. DOI: 10.1016/0734-743X(90)90046-X.
- [79] JOHNSON B C, BOWLING T J, MELOSH H J. Jetting during vertical impacts of spherical projectiles [J]. Icarus, 2014, 238: 13-22. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.05.003.
- [80] MELOSH H J, JOHNSON B C, BOWLING T J. Impact spall and fragmentation by near-surface stress wave interactions [C]//48th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas, 2017: Abstract 2051.
- [81] MELOSH H J. Impact ejection, spallation, and the origin of meteorites [J]. Icarus, 1984, 59(2): 234-260. DOI: 10.1016/0019-1035(84)90026-5.
- [82] CROFT S K. Cratering flow fields: implications for the excavation and transient expansion stages of crater formation [C]//Proceedings of the 11th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 1980: 2347-2378.
- [83] MELOSH H J, SONETT C P. When worlds collide: jetted vapor plumes and the Moon's origin [M]//HARTMANN W K, PHILLIPS R J, TAYLOR G J, eds. Origin of the Moon. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1986: 621-642.
- [84] O'KEEFE J D, AHRENS T J. The size distributions of fragments ejected at a given velocity from impact craters [J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 5(1-4): 493-499. DOI: 10.1016/0734-743X(87)90064-9.
- [85] KUROSAWA K, NAGAOKA Y, SENSU H, et al. Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2015, 120(7): 1237-1251. DOI: 10.1002/2014JE004730.
- [86] WAKITA S, JOHNSON B C, DENTON C A, et al. Jetting during oblique impacts of spherical impactors [J]. Icarus, 2021, 360: 114365. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114365.
- [87] KIEFFER S W. Impact conditions required for formation of melt by jetting in silicates [M]//RODDY D J, PEPIN R O, MERRILL R B, eds. Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications. New York: Pergamon Press, 1977: 751-769.
- [88] JOHNSON B C, MINTON D A, MELOSH H J, et al. Impact jetting as the origin of chondrules [J]. Nature, 2015, 517(7534): 339-341. DOI: 10.1038/nature14105.
- [89] WALSH J M, SHREFFLER R G, WILLIG F J. Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collisions [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(3): 349-359. DOI: 10.1063/1.1721278.
- [90] VICKERY A M. The Theory of Jetting: Application to the Origin of Tektites [J]. Icarus, 1993, 105(2): 441-453. DOI:

- 10.1006/icar.1993.1140.
- [91] SUGITA S, SCHULTZ P H. Spectroscopic characterization of hypervelocity jetting: Comparison with a standard theory [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1999, 104(E12): 30825-30845. DOI: 10.1029/1999JE001061.
- [92] SUGANDHI E, AGARWAL A, SAHA A, et al. Effects of Hugoniot properties on jet onset conditions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 188: 104930. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2024.104930.
- [93] HARLOW F H, PRACHT W E. Formation and Penetration of High-Speed Collapse Jets [J]. *The Physics of Fluids*, 1966, 9(10): 1951-1959. DOI: 10.1063/1.1761549.
- [94] SUGANDHI E, AGARWAL A. Jet onset time and velocity for various natural hypervelocity impacts [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 168: 104310. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104310.
- [95] DAHL J M, SCHULTZ P H. Measurement of stress wave asymmetries in hypervelocity projectile impact experiments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26(1-10): 145-155. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00077-X.
- [96] DAVISON T M, COLLINS G S, ELBESHAUSEN D, et al. Numerical modeling of oblique hypervelocity impacts on strong ductile targets [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, 46(10): 1510-1524. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2011.01246.x.
- [97] STICKLE A M, SCHULTZ P H. Exploring the role of shear in oblique impacts: A comparison of experimental and numerical results for planar targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(6): 527-534. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.025.
- [98] SCHULTZ P H, WROBEL K E. The oblique impact Hale and its consequences on Mars [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117 (E4): E04001. DOI: 10.1029/2011JE003843.
- [99] POELCHAU M H, KENKMANN T, HOERTH T, et al. Impact cratering experiments into quartzite, sandstone and tuff: The effects of projectile size and target properties on spallation [J]. *Icarus*, 2014, 242: 211-224. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.08.018.
- [100] ANDERSON J L B, SCHULTZ P H. Flow-field center migration during vertical and oblique impacts [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1-12): 35-44. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.022.
- [101] HOUSEN K R, HOLSAPPLE K A. Ejecta from impact craters [J]. *Icarus*, 2011, 211(1): 856-875. DOI: 10.1016/j.icarus.2010.09.017.
- [102] JOHNSON B C, MELOSH H J. Formation of melt droplets, melt fragments, and accretionary impact lapilli during a hypervelocity impact [J]. *Icarus*, 2014, 228: 347-363. DOI: 10.1016/j.icarus.2013.10.022.
- [103] ARTEMIEVA N, SHUVALOV V. Atmospheric shock waves after impacts of cosmic bodies up to 1000 m in diameter [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2019, 54(3): 592-608. DOI: 10.1111/maps.13229.
- [104] DAVISON T M, COLLINS G S. Complex Crater Formation by Oblique Impacts on the Earth and Moon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(21): e2022GL101117. DOI: 10.1029/2022GL101117.
- [105] AI H A, AHRENS T J. Effects of shock-induced cracks on the ultrasonic velocity and attenuation in granite [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B1): B01201. DOI: 10.1029/2006JB004353.
- [106] PIERAZZO E, VICKERY A M, MELOSH H J. A Reevaluation of Impact Melt Production [J]. *Icarus*, 1997, 127(2): 408-423. DOI: 10.1006/icar.1997.5713.
- [107] LUO X Z, ZHU M H, DING M, et al. Shock Melting and Melt Deposit Patterns in Oblique Impacts: Insights From Numerical Simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2025, 130(9): e2025JE009066. DOI: 10.1029/2025JE009066.
- [108] COLLINS G S, PATEL N, DAVISON T M, et al. A steeply-inclined trajectory for the Chicxulub impact [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1480. DOI: 10.1038/s41467-020-15269-x.
- [109] TURTLE E P, PIERAZZO E, COLLINS G S, et al. Impact structures: what does crater diameter mean? [M]//KENKMANN T, HÖRZ F, DEUTSCH A, eds. *Large Meteorite Impacts III*. Boulder: Geological Society of America, 2005: 1-24. DOI: 10.1130/0-8137-2384-1.1.
- [110] MELOSH H J, IVANOV B A. Impact crater collapse [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1999, 27: 385-415. DOI: 10.1146/annurev.earth.27.1.385.
- [111] GRIEVE R A F, THERRIAULT A M. Observations at terrestrial impact structures: Their utility in constraining crater formation [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2004, 39(2): 199-216. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00336.x.
- [112] OSINSKI G R, LEE P, SPRAY J G, et al. Geological overview and cratering model for the Haughton impact structure, Devon Island, Canadian High Arctic [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2005, 40(12): 1759-1776. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2005.tb00145.x.
- [113] CHRISTESON G L, MORGAN J V, GULICK S P S. Mapping the Chicxulub Impact Stratigraphy and Peak Ring Using Drilling and Seismic Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(8): e2021JE006938. DOI: 10.1029/2021JE006938.
- [114] WÜNNEMANN K, IVANOV B A. Numerical modelling of the impact crater depth-diameter dependence in an acoustically fluidized target [J]. *Planetary and Space Science*, 2003, 51(13): 831-845. DOI: 10.1016/j.pss.2003.08.001.
- [115] O'KEEFE J D, AHRENS T J. Planetary cratering mechanics [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, 98(E9): 17011-17028. DOI: 10.1029/93JE01330.
- [116] CHAPMAN C R, MCKINNON W B. Cratering of planetary satellites [M]//BURNS J A, MATTHEWS M S, eds. *Satellites*. Tucson: University of Arizona Press, 1986: 492-580.
- [117] ELBESHAUSEN D, WÜNNEMANN K, COLLINS G S. Scaling of oblique impacts in frictional targets: Implications for crater size and formation mechanisms [J]. *Icarus*, 2009, 204(2): 716-731. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.07.018.
- [118] PIKE R J. Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon [M]//RODDY D J, PEPIN R O, MERRILL R B, eds. *Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications*. New York: Pergamon Press, 1977: 489-509.
- [119] MICHIKAMI T, HAGERMANN A, MOROTA T, et al. Oblique impact cratering experiments in brittle targets:

- 1409 Implications for elliptical craters on the Moon [J]. *Planetary and Space Science*, 2017, 135: 27-36. DOI:
1410 10.1016/j.pss.2016.11.004.
- 1411 [120] MELOSH H J. *Planetary Surface Processes* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. DOI:
1412 10.1017/CBO9780511977848.
- 1413 [121] HERRICK R R, HESSEN K K. The planforms of low-angle impact craters in the northern hemisphere of Mars [J].
1414 *Meteoritics & Planetary Science*, 2006, 41(10): 1483-1495. DOI:10.1111/j.1945-5100.2006.tb00431.x.
- 1415 [122] SCHULTZ P H, EBERHARDY C A, ERNST C M, et al. The Deep Impact oblique impact cratering experiment [J]. *Icarus*,
1416 2007, 190(2): 295-333. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.06.006.
- 1417 [123] MATTHEWS E E, RAE A S P, KENKMANN T, et al. Determining impact angle from the spatial distribution of shock
1418 metamorphism: a case study of the Gosses Bluff (Tnorala) impact structure, Australia [J]. *Meteoritics & Planetary Science*,
1419 2026, 61(7): 1333-1354. DOI: 10.1111/maps.70070.
- 1420 [124] FRENCH B M. *Traces of Catastrophe: a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures*
1421 [M]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. LPI Contribution No. 954.
- 1422 [125] SCHULTZ P H, D'HONDT S. Cretaceous-Tertiary (Chicxulub) impact angle and its consequences [J]. *Geology*, 1996,
1423 24(11): 963-967. DOI: 10.1130/0091-7613(1996)024<0963:CTCIAA>2.3.CO;2.
- 1424 [126] HILDEBRAND A R, PILKINGTON M, ORTIZ-ALEMAN C, et al. Mapping Chicxulub crater structure with gravity and
1425 seismic reflection data [J]. *Geological Society Special Publication*, 1998, 140: 155-176. DOI:
1426 10.1144/GSL.SP.1998.140.01.12.
- 1427 [127] EKHOLM A G, MELOSH H J. Crater features diagnostic of oblique impacts: The size and position of the central peak [J].
1428 *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(4): 623-626. DOI: 10.1029/2000GL011989.
- 1429 [128] HERRICK R R, FORSBERG-TAYLOR N K. The shape and appearance of craters formed by oblique impact on the Moon
1430 and Venus [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38(11): 1551-1578. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2003.tb00001.x.
- 1431 [129] MCDONALD M A, MELOSH H J, GULICK S P S. Oblique impacts and peak ring position: Venus and Chicxulub [J].
1432 *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(7): L07203. DOI: 10.1029/2008GL033346.
- 1433 [130] COLLINS G S, MORGAN J, BARTON P, et al. Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub
1434 crater is caused by target heterogeneity [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270(3-4): 221-230. DOI:
1435 10.1016/j.epsl.2008.03.032.
- 1436 [131] ROBIN C Q, DUCHENE A, MURDOCH N, et al. Mechanical properties of rubble pile asteroids (Dimorphos, Itokawa,
1437 Ryugu, and Bennu) through surface boulder morphological analysis [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 6203. DOI:
1438 10.1038/s41467-024-50147-w.
- 1439 [132] CHEN M, LU Y, NING J, et al. Discovery of the Baijifeng impact structure in Tonghua, Jilin, China [J]. *Matter and*
1440 *Radiation at Extremes*, 2023, 8(5): 058403. DOI: 10.1063/5.0172186.
- 1441 [133] CHEN M, TAN D, YANG W, et al. Jinlin crater, Guangdong Province, China: impact origin confirmed [J]. *Matter and*
1442 *Radiation at Extremes*, 2026, 11(1): 013001. DOI: 10.1063/5.0301625.
- 1443 [134] HAYASHI K, SUMITA I. Low-velocity impact cratering experiments in granular slopes [J]. *Icarus*, 2017, 291: 160-175.
1444 DOI: 10.1016/j.icarus.2017.03.027.
- 1445 [135] TAKIZAWA S, NIIYA H, TANABE T, et al. Impact-induced collapse of an inclined wet granular layer [J]. *Physica D:*
1446 *Nonlinear Phenomena*, 2019, 386-387: 8-13. DOI: 10.1016/j.physd.2018.08.002.
- 1447 [136] SUZUKI A I, OKAMOTO C, KUROSAWA K, et al. Increase in cratering efficiency with target curvature in strength-
1448 controlled craters [J]. *Icarus*, 2018, 301: 1-8. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.10.019.
- 1449 [137] SHOEMAKER E M. *Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona* [M]//MIDDLEHURST B M, KUIPER G P, eds. *The*
1450 *Moon, Meteorites, and Comets*. Chicago: University of Chicago Press, 1963: 301-336.
- 1451 [138] ELBESHAUSEN D, WÜNNEMANN K. The effect of target topography and impact angle on crater formation: insight
1452 from 3D numerical modelling [C]//42nd Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas, 2011: Abstract
1453 1778.
- 1454 [139] CHANDNANI M, HERRICK R R, KRAMER G Y. Geologic Analyses of the Causes of Morphological Variations in Lunar
1455 Craters Within the Simple-to-Complex Transition [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 124(5): 1238-1265.
1456 DOI: 10.1029/2018JE005729.
- 1457 [140] FULMER C V, ROBERTS W A. Rock induration and crater shape [J]. *Icarus*, 1963, 2: 452-465. DOI: 10.1016/0019-
1458 1035(63)90073-3.
- 1459 [141] EPPLER D T, EHRLICH R, NUMMEDAL D, et al. Sources of shape variation in lunar impact craters: Fourier shape
1460 analysis [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94(2): 274-291. DOI: 10.1130/0016-
1461 7606(1983)94<274:SOSVIL>2.0.CO;2.
- 1462 [142] GÜLDEMEISTER N, WÜNNEMANN K, DURR N, et al. Propagation of impact-induced shock waves in porous sandstone
1463 using mesoscale modeling [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(1): 115-133. DOI: 10.1111/j.1945-
1464 5100.2012.01430.x.
- 1465 [143] LUTHER R, ZHU M H, COLLINS G, et al. Effect of target properties and impact velocity on ejection dynamics and ejecta
1466 deposition [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2018, 53(8): 1705-1732. DOI: 10.1111/maps.13143.
- 1467 [144] CALDWELL W K, HUNTER A, PLESKO C S, et al. Understanding Asteroid 16 Psyche's composition through 3D impact
1468 crater modeling [J]. *Icarus*, 2020, 351: 113962. DOI: 10.1016/j.icarus.2020.113962.
- 1469 [145] YUE Z Y, DI K C, LIU Z Q, et al. Lunar regolith thickness deduced from concentric craters in the CE-5 landing area [J].
1470 *Icarus*, 2019, 329: 46-54. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.03.032.
- 1471 [146] NICHOLSON U, BRAY V J, GULICK S P S, et al. The Nadir Crater offshore West Africa: A candidate Cretaceous-
1472 Paleogene impact structure [J]. *Science Advances*, 2022, 8(33): eabn3096. DOI: 10.1126/sciadv.abn3096.
- 1473 [147] BEYER R A, MCEWEN A S. Layering stratigraphy of eastern Coprates and northern Capri Chasmata, Mars [J]. *Icarus*,

- 2005, 179(1): 1-23. DOI: 10.1016/j.icarus.2005.06.014.
- [148] BELTON M J S, THOMAS P, VEVERKA J, et al. The internal structure of Jupiter family cometary nuclei from Deep Impact observations: The “talps” or “layered pile” model [J]. *Icarus*, 2007, 187(1): 332-344. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.09.005.
- [149] WU B, WANG Y, WERNER S C, et al. A Global Analysis of Crater Depth/Diameter Ratios on the Moon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(20): e2022GL100886. DOI: 10.1029/2022GL100886.
- [150] SENFT L E, STEWART S T. Modeling Impact Cratering in Layered Surfaces [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E11): E11002. DOI: 10.1029/2007JE002894.
- [151] RADUCAN S D, DAVISON T M, COLLINS G S. The effects of asteroid layering on ejecta mass-velocity distribution and implications for impact momentum transfer [J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 180: 104756. DOI: 10.1016/j.pss.2019.104756.
- [152] LINDSTRÖM M, SHUVALOV V, IVANOV B. Lockne crater as a result of marine-target oblique impact [J]. *Planetary and Space Science*, 2005, 53(8): 803-815. DOI: 10.1016/j.pss.2005.02.005.
- [153] RANGE M M, ARBIC B K, JOHNSON B C, et al. The Chicxulub Impact Produced a Powerful Global Tsunami [J]. *AGU Advances*, 2022, 3(5): e2021AV000627. DOI: 10.1029/2021AV000627.
- [154] SILBER E A, JOHNSON B C, BJONNES E, et al. Effect of ice sheet thickness on formation of the Hiawatha impact crater [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 566: 116972. DOI: 10.1016/j.epsl.2021.116972.
- [155] SOKOŁOWSKA A, THOMAS N, WÜNNEMANN K. Effects of surface and subsurface water/ice on spatial distributions of impact crater ejecta on Mars [J]. *Icarus*, 2024, 420: 116150. DOI: 10.1016/j.icarus.2024.116150.
- [156] OBERBECK V R, QUAIDE W L. Estimated thickness of a fragmental surface layer of *Oceanus Procellarum* [J]. *Journal of Geophysical Research* (1896-1977), 1967, 72(18): 4697-4704. DOI: 10.1029/JZ072i018p04697.
- [157] ORMÖ J, ROSSI A P, HOUSEN K R. A new method to determine the direction of impact: Asymmetry of concentric impact craters as observed in the field (Lockne), on Mars, in experiments, and simulations [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(3): 403-419. DOI: 10.1111/maps.12065.
- [158] BASU S, DASGUPTA N, KUNDU A, et al. The role of pre-existing faults and fractures in shaping polygonal impact craters and its tectonic implications in the southern margaritifer terra region, Mars [J]. *Journal of Earth System Science*, 2022, 131(2): 97. DOI: 10.1007/s12040-022-01857-6.