

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0255

近地小天体对地撞击成坑模型研究进展*

刘文近¹, 张庆明¹, 马晓荷¹, 龙仁荣¹, 任健康¹, 龚自正², 武 强², 任思远²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 近地小天体对地撞击成坑是行星研究的前沿问题之一。本文中介绍了陨石坑成坑过程与类型、实验室模拟成坑现象和陨石坑成坑模型律, 分析了近地小天体对地撞击成坑机理和点源模型的不足, 指出了近地小天体对地撞击成坑未来研究的发展趋势。

关键词: 陨石坑; 超高速碰撞; 点源模型; 相似律; 耦合参数

中图分类号: O383; O303

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

A review of the models of near-Earth object impact cratering on Earth

LIU Wenjin¹, ZHANG Qingming¹, MA Xiaohe¹, LONG Renrong¹,

REN Jiankang¹, GONG Zizheng², WU Qiang², REN Siyuan²

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

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

Abstract: Near-Earth object (NEO) impact cratering is one of the frontier themes in planetary research. The cratering process and types, laboratory impact cratering phenomena, and cratering scaling are introduced. The hypervelocity impact-cratering process is conventionally divided into three successive stages: contact and compression, excavation, and modification. When large impact craters are formed in geological materials, shearing is the main deformation mode. At small scales, cratering in brittle materials is dominated by surface spalling; much of the crater volume consists of a wide, flat spall zone. According to the morphological characteristics of impact craters, impact craters are generally divided into two groups: simple and complex craters. The cratering mechanism of NEO impact cratering and the deficiency of the point-source model are analyzed. The cratering mechanism can be divided into strength regime and gravity regime. In the strength regime, the cratering results are controlled by strength, and in the gravity regime, the cratering results are dominated by gravity. Crater scaling laws have been established based on dimensional analysis, point-source approximation and the results of experimental and numerical impact. The scaling law is a specific power rate form, which describes well the scaling of crater size, ejecta, and crater growth. But the scaling law of the point-source model is not applicable to the experimental phenomena in several impactor radii. The suggestions for future research of NEO impact cratering are pointed out: (1) scaling where the point-source hypothesis is not applicable; (2) the effect of melting, gasification, atmosphere and temperature on the cratering process; (3) the scaling law and model of oblique impact; (4) momentum enhancement effect of impact; (5) experimental and numerical methods to simulate the formation of impact craters.

Keywords: impact crater; hypervelocity impact; point source model; scaling; coupling parameter

* 收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-08-24

基金项目: 民用航天预研项目(D020304)

第一作者: 刘文近(1993—), 男, 博士研究生, lwj931@163.com

通信作者: 张庆明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, qmzhang@bit.edu.cn

地球表面长期以来一直受到陨石、小行星和彗星等近地小天体的撞击^[1]。但近地小天体撞击地球的频率很低,几千万年才有可能发生一次行星级撞击地球大灭绝事件,100 年时间范围内产生的更多是局部自然灾害^[2]。例如,6600 万年前,一颗直径超过 10 km 的小行星撞击地球形成了一个直径约 200 km 的陨石坑,是距今最近的一次小行星撞击地球引发的物种灭绝事件,改变了地球生命的进化过程^[3-5]。目前已经发现的近地小天体中,绝大多数尺寸在 1 km 以下,它们在成分、大小、形状和表面属性方面表现出很大的变化性和多样性^[6]。而且,已发现的对地球有潜在威胁的近地小天体绝大多数是近地小行星,近地小行星撞击地球的典型速度为 12~20 km/s^[7]。近地彗星只占有所有潜在威胁的近地天体的一小部分(约 10%),但通常具有更高的对地撞击速度,短周期彗星 15~35 km/s,长周期彗星 40~70 km/s^[8]。和其他星球相比,地球由于有大气层的保护,材质强度和体积较小的近地小行星在穿越地球大气层的过程中,会发生减速、变形、烧蚀和解体,降低撞击产生陨石坑的概率^[7,9]。直径大于 60 m 的石质陨石或大于 20 m 的铁质陨石才能以高于 11 km/s 的初始速度顺利穿过地球大气层撞击地球^[9]。陨石坑是近地小天体超高速撞击地球表面形成的凹坑或环状地质构造^[10]。随着地质调查的深入,近几十年来世界各地不断有陨石坑被发现和证实。

本文中介绍陨石坑成坑过程与类型、实验室模拟成坑现象和陨石坑成坑模型律,分析近地小天体对地撞击成坑机理和点源模型的不足,指出近地小天体对地撞击成坑未来研究的发展趋势。

1 地球陨石坑

1.1 陨石坑数量和分布

陨石坑是近地小天体撞击地球的记录或遗迹,为研究近地天体撞击地球的地质效应和撞击坑的结构提供了重要的地面真实数据^[11]。但地球遭受着活跃的侵蚀、火山和地质构造活动,不断地从岩石记录中抹去撞击结构^[12-14]。尽管如此,到目前为止,世界上共发现了超过 200 个陨石坑,而且每年都有几个新的撞击地点被确认^[12]。地球陨石坑分布如图 1 所示,陨石坑直径从 m 级到 100 km 以上,世界各个大洲均有分布,但分布不均,其中仅有 2 个陨石坑位于中国境内,即辽宁岫岩陨石坑和黑龙江省依兰陨石坑^[10-11]。Dominion 建立了世界上已发现陨石坑的数据库 (Earth impact database, <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/index.html>),数据库详细介绍了陨石坑命名、大小、分布、形成年代等信息^[15]。

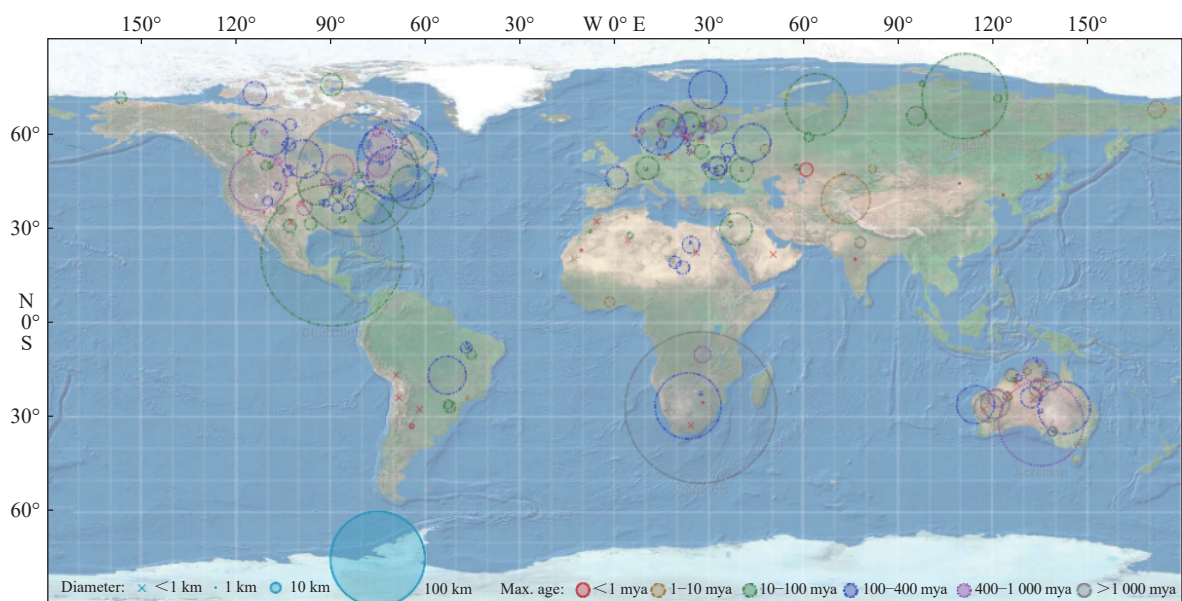


图 1 地球撞击坑数据库世界地图

Fig. 1 Earth impact cratering database world map

1.2 陨石坑成坑过程

Gault 等^[16] 最先将近地天体撞击地球形成陨石坑的过程划分为接触压缩、开坑和调整 3 个连续阶段。每个阶段都由不同的物理过程所主导^[17-18]。本文中主要描述的是均质小行星体垂直撞击无大气层和无地表水的简化情况。

1.2.1 接触和压缩阶段

如图 2(a) 所示, 地球陨石坑成坑第一阶段是从弹丸(小行星或者彗星)接触到靶(地球)表面时开始的^[17], 弹丸接触地表并向下侵彻, 侵彻深度不超过 1~2 倍的弹径^[20-21]。弹丸的动能以冲击波的形式传递到靶中, 在碰撞点附近, 最大冲击波压力在一定区域内几乎不变^[22], 通常为几百 GPa 或更高^[9], 温度超过 10 000 K^[18]。冲击波出现在被压缩和未压缩靶材料的边界处, 并分别向上向下传播^[17]。当向上传播的冲击波到达弹丸的自由表面时, 以稀疏波的形式反射回弹丸内^[23]。稀疏波使弹丸从高冲击波压力卸载, 导致弹丸本身完全熔化或气化^[16-17]。同时, 伴随冲击压缩而来的内能升高和随后降低也会导致靶内物质冲击变质、熔化和气化^[8-9]。一般的大型撞击坑形成过程中熔化气化的靶体积基本与初始的撞击体体积相当, 气化的物质形成“冲击羽流”向上膨胀, 其中包含气化岩石、熔化液体、小固体碎片和大气等几部分物质^[23]。接触和压缩阶段的主要结果是弹丸的大部分动能转化成靶和弹的内能和动能, 剩余的动能消耗在抛射弹靶材料上, 在靶体表面产生一个弹坑^[18]。当弹丸背面反射的稀疏波到达弹靶物质界面处时, 弹丸本身完全卸载, 通常被认为是接触和压缩阶段的结束点^[17]。

1.2.2 开坑阶段

上一阶段末尾弹丸完全卸载, 因此在开坑阶段不再考虑弹丸对靶板的作用, 靶板中的粒子在剩余速度作用下继续开坑, 典型粒子速度为冲击波过后峰值速度的 1/5^[18]。如图 2(b) 所示, 在开坑阶段, 大致呈半球形的冲击波向外传播进入靶板, 冲击波使靶材料运动, 并具有初始向外的径向流动^[17]。同时, 最初向上传播的冲击波与地面相交, 产生稀疏波, 然后向下传播到靶内^[17]。向外的冲击波和向下的稀疏波的组合产生开挖流场, 并产生所谓的瞬态空腔^[12]。材料在开挖流场不同区域的运动轨迹不同, 导致瞬态空腔划分为上开挖区和下位移区^[12]。上部区域的物质被抛射到瞬态空腔边缘之外, 形成连续的抛射层^[18]。当靶内材料的剩余动能不足以抗衡材料强度和重力继续剪切材料或抛出物质扩大成坑体积, 从而形成最大瞬时撞击坑。最大瞬时撞击坑是一个深的碗形洞, 横截面类似抛物线, 最大瞬时坑直径可达弹丸直径的 10~20 倍, 深径比为 1/2~1/3^[24-25]。对于一些大型撞击坑, 开坑流各个方向流动并不相同, 很可能在侧面向外的拓展过程尚未结束时, 瞬时坑底部已经停止运动, 并开始下一阶段^[18]。

1.2.3 调整阶段

一般认为, 调整阶段开始后, 开挖阶段已经结束。调整阶段对成坑形貌的影响取决于瞬态空腔的大小和靶岩性质^[26]。根据最大瞬时坑是否坍塌, 形成简单坑与复杂坑。地球上直径小于 2~4 km 的陨石坑形成过程中瞬态空腔只经过如地面回弹, 侧壁滑坡、沉降等微小的改变, 从而形成了一个简单的碗状陨石坑(见图 2(c))^[12]。然而, 当最大瞬时坑直径超过一定阈值, 在达到最大直径之前, 陨石坑底部已经开始隆起, 形成中央隆升, 瞬态空腔会受到引力的影响而发生改变, 产生所谓的复杂坑(见图 2(c))。简单坑向复杂坑转变的临界尺寸取决于行星表面重力和岩石强度大小, 并随着重力加速度的减小而增大^[17, 27]; 地球上结晶岩和沉积岩陨石坑从简单陨石坑到复杂坑转化临界尺寸分别为 4 和 2 km^[18]。调整阶段没有明确的结束标志。

1.3 陨石坑类型

根据陨石坑形貌特征, 陨石坑一般分为两种: 简单的陨石坑和复杂的陨石坑^[12]。

1.3.1 简单坑

如图 3(a) 所示, 简单的陨石坑成碗状, 具有隆起的边缘, 底部充满异地角砾岩, 该透镜体主要由未受冲击的物质组成, 可能与冲击熔融的岩石混合^[25]。坑底的角砾岩是由于瞬态空腔壁的坍塌而滑落下来形成的, 不是回退物质。由于侧壁滑坡和沉降这些后期调整, 最终形成的陨石坑明显不同于最大瞬时撞

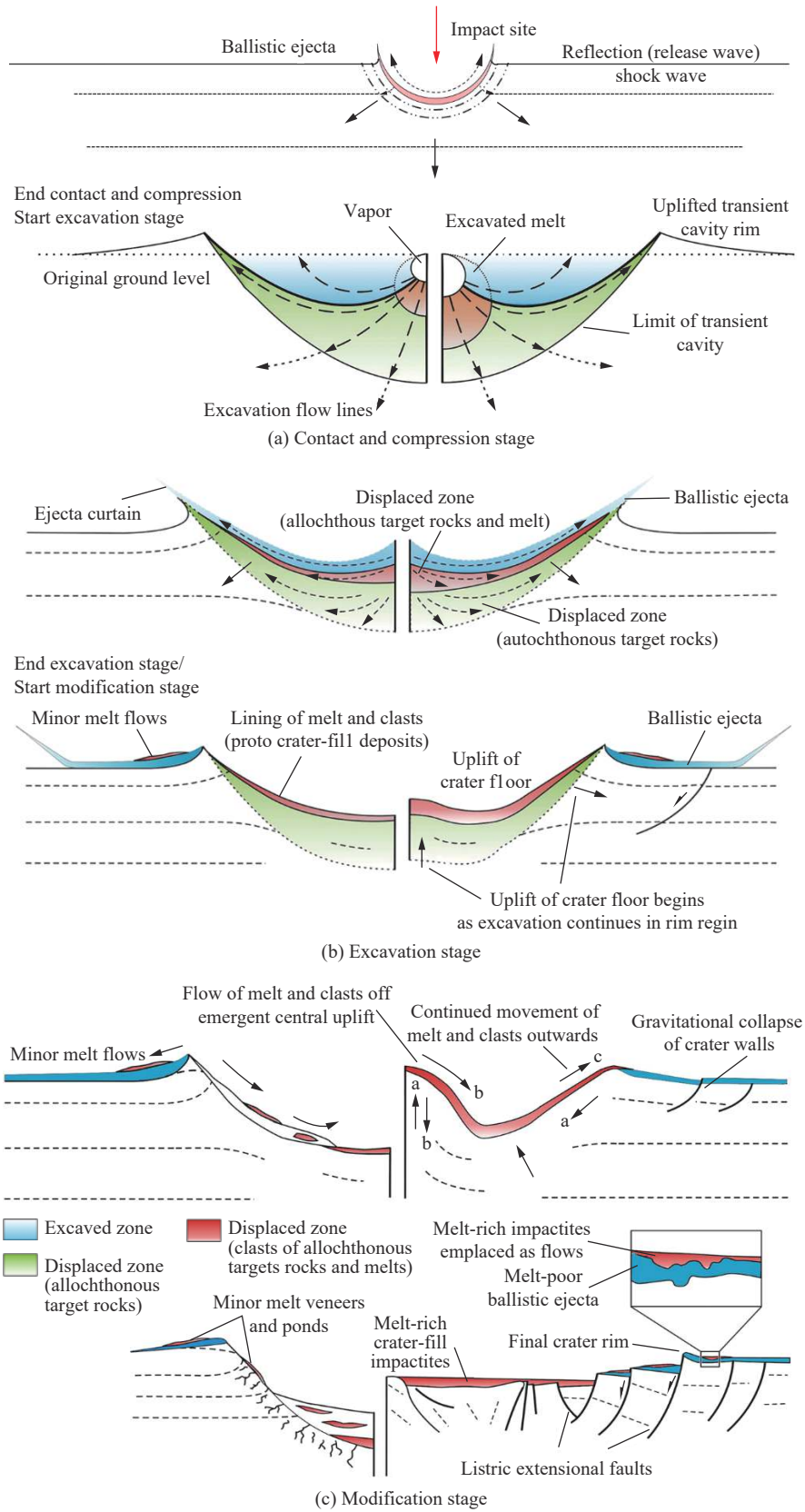


图 2 简单坑和复杂坑形成过程的示意图^[12, 19]

Fig. 2 Series of formation of simple and complex craters^[12, 19]

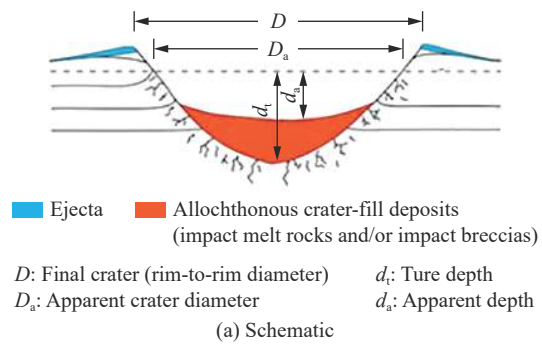
击坑,形成的简单陨石坑的深度与直径之比通常为 1 : 5~1 : 7^[17,28]。Pilkington 等^[29]通过对地球表面 8 个简单陨石坑形态测量数据分析,定义了陨石坑表面深度 d_a 和真实陨石坑深度 d_t 分别与最终陨石坑结构边缘直径 D 关系的经验公式,分别为 $d_a = D^{1.06}$ 和 $d_t = 0.28D^{1.02}$, 其中 d_a 为陨石坑表面深度 (km), d_t 为真实陨石坑深度 (km), D 为最终陨石坑结构边缘直径 (km)。如图 3(b) 所示,巴林杰陨石坑是地球上最早被确认的撞击陨石坑之一,也是最著名的简单撞击陨石坑,直径为 1.2 km,保存完好,位于美国的亚利桑那州^[30-31]。

1.3.2 复杂坑

如图 4(a) 所示,随着陨石坑直径进一步增大,开坑过程中形成的瞬时坑尺寸过大,使得材料强度无法抵抗重力作用而坍塌,坍塌过程中材料向中心汇聚流动,中心部分抬升最快,应变最大,形成中心凸起^[21],标志着复杂陨石坑的形成^[12]。复杂的陨石坑在调整阶段发生崩塌和中央隆起,比简单的陨石坑浅,深径比为 1 : 10~1 : 20^[17]。复杂陨石坑环形槽中充满了各种各样的冲击变质岩,复杂陨石坑形成的中央隆起使地壳深处物质被带到表面,中央隆起结构成为靶深处的岩石的样品,为了解地壳结构提供了重要的线索^[12]。例如,南非弗雷福特撞击坑的中央隆起直径约 250 km,提供了一个独特的下地壳轮廓线^[32]。根据对地球上沉积岩中形成的 24 个撞击坑的观察,陨石坑中央隆起的高度约为 $0.086D^{1.03}$, D 为最终陨石坑结构边缘直径。图 4(b) 所示加拿大北极德文岛的霍顿陨石坑表面直径约 30 km,是一个复杂坑,因受地面侵蚀作用改变了原始形貌,缺乏突起的中央峰^[33-34]。

2 实验室模拟成坑现象

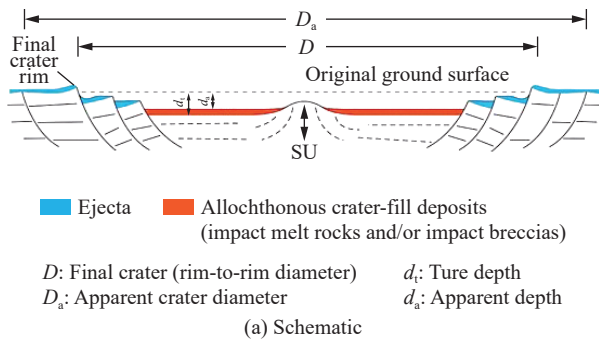
几十年来,研究人员已通过爆炸成坑实验、小尺度超高速碰撞实验、离心机(见图 5)实验对陨石坑的形成过程和机理进行了广泛的研究^[36-38]。目标材料主要包括延性金属、脆性岩石、冰、低强度冲积土和砂等材料^[39-41]。常见化学爆炸模拟冲击实验是对强度机理控制下撞击成坑过程的近似。超高速撞击实验由于实验条件的限制,碰撞速度多在 10 km/s 以下,发射弹丸尺寸在 cm 级以下,远小于小行星的大小和小行星撞击地球的



(b) Picture

图 3 简单的陨石坑^[12]

Fig. 3 Simple impact crater^[12]



(b) Picture

图 4 复杂的陨石坑^[19]

Fig. 4 Complex impact craters^[19]

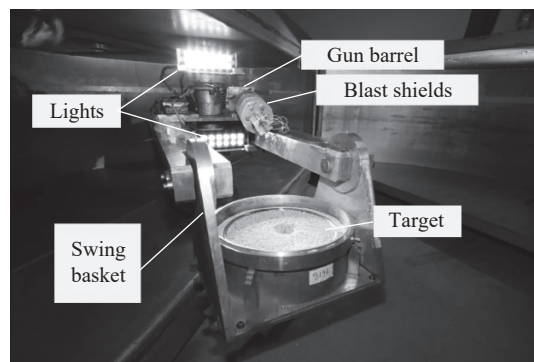


图 5 波音公司 600g 土工离心机^[35]

Fig. 5 The Boeing 600g geotechnical centrifuge^[35]

速度。靶板尺寸在 1 m 以下, 形成的坑的大小在分米量级, 远小于陨石坑的大小。小尺度超高速碰撞岩石、冰等材料实验成坑结果受目标材料的强度控制, 无法模拟在大尺度碰撞中的重力效应。离心机实验则是能模拟重力控制机理的实验手段, 高加速度状态下冲击成坑可以模拟大尺寸陨石坑形成过程, 但无法模拟目标在三维重力场的作用下的冲击破坏, 而且碰撞速度 2 km/s 以下。由于这些局限性, 实验室实验只能探测到小行星撞击地球成坑问题参数空间的一小部分。

2.1 实验室超高速碰撞成坑过程

实验室超高速碰撞成坑过程与天体碰撞形成陨石坑的过程类似, 但又有所不同。如图 6 所示, 实验室超高速撞击半无限厚靶的物理过程大致也可以分为 3 个阶段^[42-43]。实验室超高速碰撞成坑过程第 I 阶段与陨石坑接触和压缩阶段类似, 是从弹丸接触到靶表面时开始的, 碰撞点压力迅速升到极值, 冲击波从碰撞点大体呈半球形扩展衰变, 自由表面的稀疏波则向对称轴方向卸载, 使冲击波趋势减弱; 同时坑底速度也迅速上升, 坑形开始发展, 能量迅速从弹传给靶^[29, 43]。与近地小天体对地撞击成坑过程相比, 这一阶段持续时间极短, 通常为 μs 量级^[44], 而直径 10 km 的小行星以 20 km/s 的速度碰撞目标, 接触和压缩阶段持续时间约为 0.5 s^[12, 44]。而且由于发射速度的限制, 实验冲击过程中材料发生熔化、气化的体积很少。如图 7 所示, 第 II 阶段大量破碎的物质被抛射到瞬态空腔边缘之外, 弹丸变扁, 弹丸材料和坑底附近的靶材料具有缓变的速度分布, 界面速度不断降低, 但变化比较缓慢; 坑形迅速发展, 压力迅速下降, 弹丸材料已广泛地铺开在坑底上, 不再有动

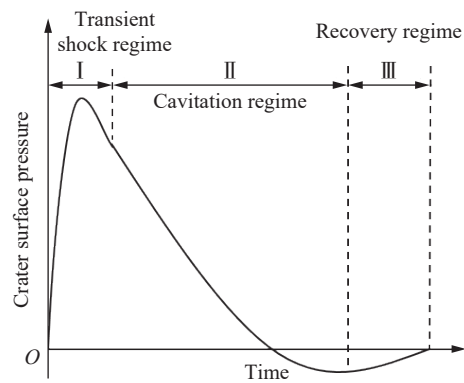


图 6 成坑表面压力与时间曲线^[42]

Fig. 6 The crater surface pressure versus time^[42]

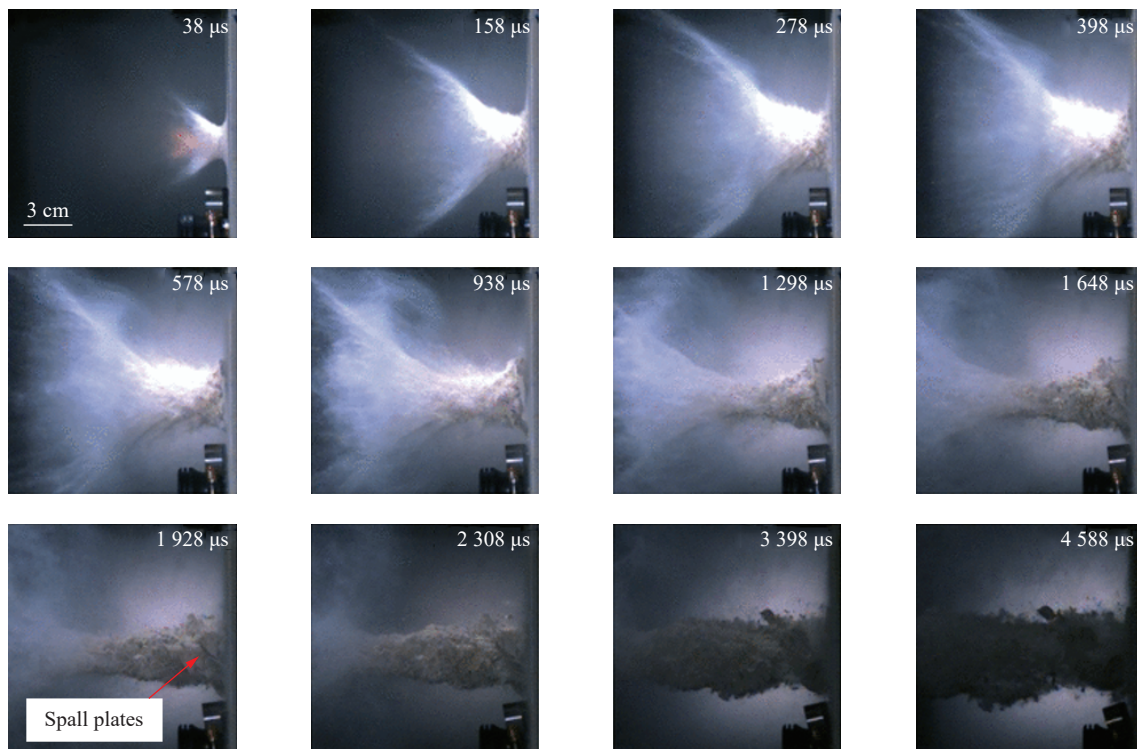


图 7 钢弹丸以 4.8 km/s 撞击干砂岩成坑过程中抛射物的演化^[45]

Fig. 7 Typical evolution of ejecta at different times after a steel projectile impacting dry sandstone at 4.8 km/s^[45]

能供给靶材, 坑形的变化依靠材料的惯性, 在材料强度阻力作用下逐渐减速直至静止形成最大瞬时撞击坑^[44]。实验室冲击厚靶成坑在第Ⅲ阶段形成的最大瞬时撞击坑不会崩塌, 只在材料的弹性应力作用下经历了简单的回缩, 最终形成陨石坑形近似于最大瞬时坑, 近似于碗状, 形成的简单坑的深度与直径之比通常约为 1 : 2^[42-44]。

2.2 实验室成坑形貌特征

2.2.1 金属靶板成坑形貌特征

通过对球形或短粗弹丸撞击半无限金属目标实验结果分析得到了弹坑形状与撞击条件之间的基本关系^[46]。图 8 是弹坑深度 h 和弹坑直径 d_c 的比值 h/d_c 与初始冲击速度 v_0 的关系。如图 8 所示, 在低速阶段, 高强、高密度弹丸对低强度、低密度目标的冲击, 弹丸保持完好, 形成直径略大于弹丸直径的深孔弹坑 ($h/d_c > 0.5$)。如果撞击速度足够高, 弹丸会发生变形甚至被压碎, 弹坑深度 h 会随着撞击速度的升高而减小, 成坑形状逐步向半球形演变, 直到 $h/d_c = 0.5$ 为止^[46]。如图 9 所示, 所有的金属撞击坑有一个共同特征: 撞击点中央形成了典型的半球形坑。由于冲击波和稀疏波在表面的相互作用, 球形坑周边形成一圈剥落形成的浅坑^[47]。因此, 半球形弹坑通常被认为是超高速撞击金属的典型状态^[5, 46-47]。

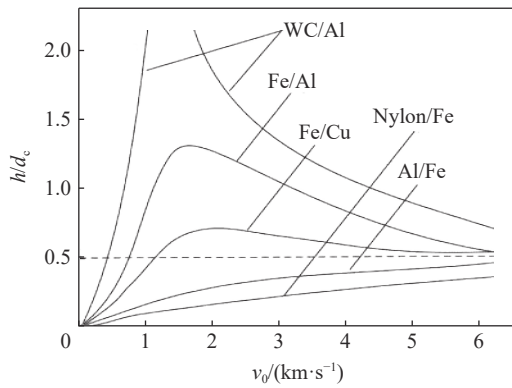


图 8 成坑形状与撞击速度的关系^[46]

Fig. 8 The relationship between crater shape and impact velocity^[46]

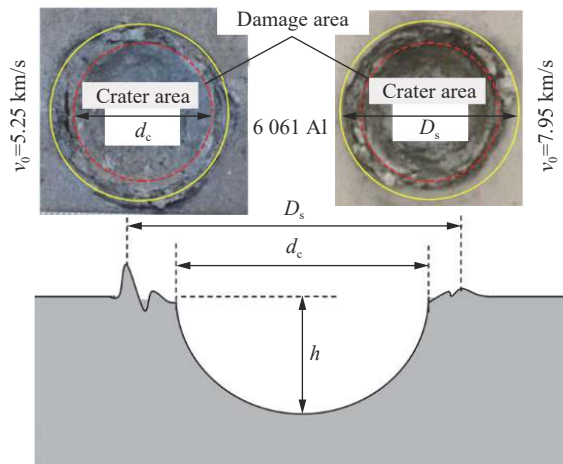


图 9 典型的半球形金属坑和剖面图^[47]

Fig. 9 Typical hemispherical metal crater and profile^[47]

2.2.2 岩石类靶板成坑形貌特征

通过对实验室 2.5~7.8 km/s 超高速冲击岩石实验形成的坑形态测量分析发现, 所有岩石坑形态特征与实验参数无关^[48-50]。如图 10(a) 所示, 所有实验岩石类的共同特征, 陨石坑在脆弱的浅色中心区域有一个大的中央凹陷(区域 I), 以及具有初始层裂区域的外部层裂带(区域 II)^[50]。在这些坑的形态中记录了两种不同的成坑力学过程, 即颗粒破碎和颗粒间拉伸断裂^[50-51]。区域 I 近似于材料压缩、粉碎和开挖流形成的瞬态坑的形状, 而区域 II 则是颗粒间拉伸断裂和层裂的结果^[50]。图 10(b) 中彩色线是由 3D 扫描不同冲击速度下冲击干砂岩形成的坑剖面轮廓线^[48]。黑色的二次抛物线曲线是冲击过程中形成的瞬态陨石坑尺寸, 瞬态和最终陨石坑的尺寸显示了相同的趋势: 陨石坑体积都随着撞击能量的增加而增加, 但瞬态坑的体积的比例占最终的弹坑体积的比例随着弹丸质量和速度的增加而减小, 层裂形成坑的体积占最终成坑体积随着弹丸质量和速度的增加而增大, 占比在 50% 以上^[48]。因此, 层裂片飞散成坑主导实验室碰撞实验结果^[49, 52]。产生这种现象主要原因是对于岩石材料, 冲击波和稀疏波在表面相互作用时, 会导致材料发生拉伸破坏, 形成层裂飞片, 极大地提高陨石坑的成坑体积和直径, 形成的成坑直径远大于成坑深度^[51]。而实际的天体碰撞能造成强大的冲击波在靶内传播, 使得在冲击波卸载后靶板粒子依旧保留很高的剩余速度继续扩张, 剪切流动成坑, 因此天体碰撞事件剪切抛射主导成坑过程, 多形成千米以上的撞击坑^[35]。

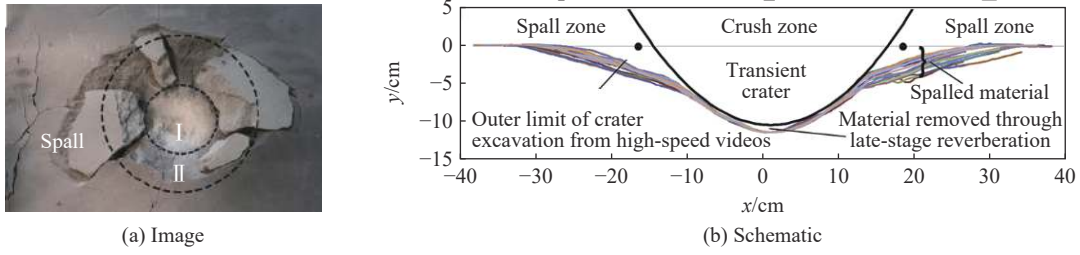


图 10 岩石类陨石坑^[48,50]

Fig. 10 Rocky impact crater^[48,50]

3 成坑模型律

陨石坑成坑模型律将陨石坑的特征与冲击条件以及弹靶材料特性等初始条件联系起来^[53]。模型律有利于简化小尺度模型实验,也是将实验室的结果应用于小行星碰撞和小行星撞击地球形成陨石坑的必要条件^[35,53]。本节中首先推导陨石坑成坑力学的一般相似律模型,然后总结开坑经验公式,最后以点源形式统一表示成坑相似律。

3.1 相似分析

冲击成坑和相关现象依赖撞击条件、弹丸和靶的材料特性^[35]。对于非高孔隙率地质材料,超高速撞击形成的弹坑的大小(体积 V 、半径 R 或深度 h)取决于问题的初始条件:球形弹丸的半径 a 、速度 U 、密度 δ ,靶的强度 Y 、黏度 η 、密度 ρ 以及重力加速度 g 。问题的其他材料参数和物质常数可能也会影响问题的结果,在不失一般性的情况下,所有剩余的材料的物质常数和函数,可以通过除以材料的强度、黏度、质量密度这3个基本物质常数的适当组合,写成无量纲形式,记 Π_n 为剩余的材料的物质常数和函数无量纲物质集合。假设小行星是垂直于地球表面撞击,陨石坑的体积 V 是这些变量的函数:

$$V = f(a, U, \delta, g, \rho, Y, \eta, \Pi_n) \quad (1)$$

用参数 ρ 、 U 、 a 对式(1)进行无量纲化:

$$\frac{V}{a^3} = f\left(\frac{ga}{U^2}, \frac{\rho}{\delta}, \frac{Y}{\rho U^2}, \frac{\eta}{\rho U a}, \Pi_n\right) \quad (2)$$

式(1)变量减少了3个。弹丸和靶材料保持不变,可以忽略常数项 ρ/δ 和 Π_n ,式(2)进一步简化为:

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

或

$$\frac{\rho V}{m} = f\left(\frac{ga}{U^2}, \frac{Y}{\rho U^2}, \frac{\eta}{\rho U a}\right) \quad (4)$$

式中: m 为弹丸的质量, $m = \frac{4\Pi}{3}\delta a^3$;记 $\Pi_V = \frac{\rho V}{m}$,称为成坑效率; $\Pi_2 = \frac{ga}{U^2}$,为弗劳德数的倒数,表示重力与惯性力之比; $\Pi_3 = \frac{Y}{\rho U^2}$,为柯西数,表示重力与地表强度之比; $\Pi_4 = \frac{\eta}{\rho U a}$,为雷诺数,表示流体惯性力与黏性力之比^[53]。因此,对于给定材料的弹丸和靶,不同大小的弹丸 a 、速度 U 和重力 g 下的冲击成坑最多受3个无量纲参数控制:弗劳德数、柯西数和雷诺数^[54]。

许多与成坑有关地质材料都被认为是与率无关的。在这种情况下,材料没有黏度单元物质常数 η 。这种与速率无关的假设对许多材料近似适用^[54]。在这种情况下,式(3)或(4)可以进一步简化为:

$$\frac{V}{a^3} = f(\Pi_2, \Pi_3) \quad (5)$$

或

$$\Pi_V = f(\Pi_2, \Pi_3) \quad (6)$$

冲击成坑结果受 2 个无量纲参数控制, 2 个无量纲变量定义了 2 种成坑效应: 强度和重力效应^[55-56]。根据 2 个独立参数的比值, 可以将其中的任意一个替换为另一个:

$$\Pi_V = f\left(\frac{\rho g a}{Y}, \Pi_3\right) \quad (7)$$

或

$$\Pi_V = f\left(\frac{Y}{\rho g a}, \Pi_2\right) \quad (8)$$

如果撞击地球的天体尺寸只在米量级, 地层岩石的强度 Y 远大于陨石坑半径深度处的岩石围压 $\rho g h$, 式 (7) 第一个参数变得很小, 重力效应对成坑结果的影响可以忽略, Π_V 只是 Π_3 的函数, 式 (7) 变为:

$$\Pi_V = f(\Pi_3) \quad (9)$$

在 $Y \gg \rho g a$ 区间, 陨石坑的大小取决于地层岩石强度, 强度控制最终形成陨石坑大小。在强度效应控制下成坑体积与弹丸的体积、质量成正比, 在速度不变的情况下与其能量也成正比, 而成坑的几何尺寸如直径与撞击体体积的立方根成正比^[53]。

对于大尺寸近地小天体撞击地球, 式 (8) 第一个参数变得很小, 强度影响可以忽略。 Π_V 只是 Π_2 的函数。在 $\rho g a \gg Y$ 区间, 陨石坑的大小由重力决定, 重力控制成坑结果。在重力主导区域, 式 (8) 形式为:

$$\Pi_V = f(\Pi_2) \quad (10)$$

在重力效应控制下, 成坑体积与撞击体的体积或质量不成正比, 与弹丸的动能也不一定成正比^[53]。成坑体积对弹丸强度、大小或速度特定函数的依赖关系需要通过实验或数值方法确定。

3.2 实验室开坑经验公式

自 20 世纪 50 年代以来, 研究人员进行了大量半无限目标高速/超高速碰撞实验, 研究近地小天体撞击地面成坑过程^[57]。通过对实验结果的分析, 获得了大量经验公式。

3.2.1 强度机理控制下开坑经验公式

Herrmann 等^[58]总结了 1958—1987 年获得的球形弹丸冲击厚板开坑的经验公式, 张庆明等^[44]综述了金属厚靶开坑模型律。这些公式可以一致表示为:

$$h/d_p = K_1(\rho_p/\rho_t)^m (v^*)^n \quad (11)$$

式中: h 为成坑深度, d_p 为弹丸直径, ρ_p 和 ρ_t 分别为弹丸和靶的密度, K_1 、 m 和 n 为通过实验数据拟合得到的参数。 m 、 n 和无量纲速度 v^* 如表 1 所示。大多数实验结果拟合参数 n 等于或接近 2/3, 说明坑深和弹速的 2/3 次方成正比。 v^* 的差异表明了对高速碰撞的成坑机理的不同认识。 $v^* = \sqrt{\rho_t v^2/Y_t}$ 或 $v^* = \sqrt{\rho_t v^2/H_B}$ 强调了目标材料的惯性和强度的重要性, $v^* = v/c_t$ 强调了目标材料的可压缩性重要性^[44]。 Sedgwick^[59]、向家琳^[60] 和罗忠文^[61] 认为强度作用比可压缩性重要, 但也需要考虑可压缩性的影响, 分别建立了同时考虑惯性、强度和可压缩性的经验公式。

Sedgwick^[59] 拟合的经验公式:

$$h/d_p = 0.482(\rho_p/\rho_t)^{0.537} \left(\sqrt{v_0/\sqrt{Y_t/\rho_t}} \right)^{0.47} (v_0/c_t)^{0.106} \quad (12)$$

向家琳^[60] 根据同种弹靶材料实验拟合的经验公式:

$$h/d_p = 0.37 \left(\sqrt{v_0/\sqrt{Y_t/\rho_t}} \right)^{0.56} (v_0/c_t)^{0.11} \quad (13)$$

罗忠文^[61] 根据同种弹靶材料实验结果拟合的经验公式:

$$h/d_p = 0.51 \left(\sqrt{v_0/\sqrt{Y_t/\rho_t}} \right)^{0.46} (v_0/c_t)^{0.20} \quad (14)$$

Holsapple 等^[72-73] 的实验表明: 对于小型的(直径小于几 m)冲积土化学爆炸坑, 冲积土的成坑的结果

与金属的结果很相似, 强度主导成坑结果, 成坑体积依赖于弹丸半径 a 和速度 U 以及材料的强度 Y , 得到的无量纲成坑体积经验公式为:

$$\frac{V}{a^3} \propto \left(\frac{Y}{\delta U^2} \right)^{-\beta} \quad (15)$$

金属的指数 β 约为 $0.83 \sim 0.85$ ^[55], 冲击黏土的指数 β 似乎更小, 但目前还没有准确的数值^[74]。

表 1 公式 (11) 中参数

Table 1 The parameters value of equation (11)

m	n	v^*	注释	来源
2/3	2/3	v/c_t		文献 [62-63]
1/2	2/3	v/c_t		文献 [64]
1/3	0.58	v/c_t		文献 [65]
2/3	2/3	$\sqrt{\rho_t v^2 / Y_t}$		文献 [47, 66-67]
1/3	2/3	$\sqrt{\rho_t v^2 / Y_t}$		文献 [68]
0.725	2/3	$\sqrt{\rho_t v^2 / Y_t}$		文献 [69]
0.523	0.3545	$\sqrt{\rho_t v^2 / Y_t}$		文献 [55]
0.448	0.563	$\sqrt{\rho_t v^2 / Y_t}$		文献 [44]
2/3	2/3	$\sqrt{\rho_t v^2 / H_B}$	H_B 是布氏硬度	文献 [70]
0.62	0.48	$\sqrt{\rho_t v^2 / H_B}$	2.6 km/s < v ≤ 5 km/s	文献 [71]
0.5	0.68		$v > 5$ km/s	

3.2.2 重力机理控制下开坑经验公式

Schmidt 等^[75] 通过如图 5 所示的离心机, 实验最大的加速度达到 514g, 冲击速度为 1.8 km/s, 明确发现了成坑机理从强度主导到重力主导的转变。冲击干砂和大当量爆炸成坑实验^[55, 72-73, 75] 结果表明, 当成坑尺寸足够大或大重力条件下形成的坑, 重力主导成坑结果, 无量纲成坑体积经验公式为:

$$\frac{V}{a^3} \propto \left(\frac{ga}{U^2} \right)^{-\alpha} \quad (16)$$

实验结果表明 α 在 $0.4 \sim 0.5$ 之间。如图 11 不同实验拟合的经验公式曲线所示, Holsapple 等^[55] 根据砂离心机爆炸成坑实验数据拟合的得到 $\alpha = 0.472$, 而对 Gault 等^[37] 冲击水的实验数据拟合得到 $\alpha = 0.648$ 。Gault 等^[37] 假设弹丸动能 ($\delta a^3 U^2$) 是控制成坑大小的唯一参数, 而不是分别依赖于 a 、 U 和 δ , 得到 $\alpha = 3/4$, 结果和干砂结果不同。另外, Opik 等^[76] 认为弹丸的动量是控制成坑大小的唯一参数, 得到参数 $\alpha = 3/7$ 。

不同假设得到的成坑相似律存在着显著的差异, 函数 f 的形式始终不能确定, 因此函数的形式需要进一步简化。

3.3 点源相似成坑模型律

不同假设得到成坑相似律存在着显著的差异, 导致了对其通用性和适用性的争议。在这一基础上,

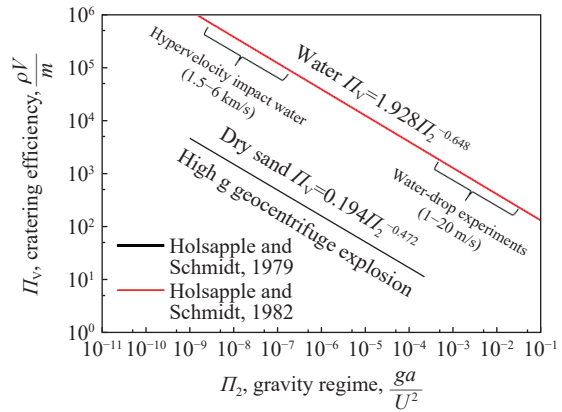


图 11 不同实验拟合的经验公式曲线

Fig. 11 Empirical formula curves fitted by different experiments

Holsapple 等^[54] 提出了综合考虑能量和动量作用的方法, 并将这一理论发展成点源模型并详细描述了经典的成坑的点源相似理论。点源假设认为, 当碰撞效应范围远大于碰撞体本身时, 成坑尺寸应该仅由 1 个变量决定, 而非独立的 3 个参数 a 、 U 、 δ 决定。引入耦合参数 C , $C = aU^\mu\delta^\nu$, μ 和 ν 是与材料相关常数, 作为相似律模型的参数, 模型借鉴与核爆冲击波传播模型相似的思想。对于发生在距离撞击器几倍半径之外的实验现象, 点源模型认为撞击器的效果可以用等效的能量和动量点源代替, 撞击器的细节对几倍撞击器半径外的结果影响很小, 均适用点源模型^[54]。除了最后的陨石坑大小, 点源模型也可以应用于撞击坑形成的动态过程, 包括撞击坑的形成时间^[77]、冲击传播和衰减^[53] 和瞬态陨石坑的增长历史^[74] 等。但在冲击点几个撞击器半径内的实验现象, 点源模型相似律不适用^[53]。点源假设的引入简化了相似关系, 使相似律呈现特定的幂函数形式。Holsapple 等^[54] 根据耦合参数假设得出了统一的陨石坑相似理论^[54]。

3.3.1 点源成坑相似律

使用耦合参数 $aU^\mu\delta^\nu$ 代替式 (1) 中的 a 、 U 、 δ , 得到:

$$V = f(aU^\mu\delta^\nu, \rho, Y, g) \tag{17}$$

分别取 $\{C, \rho, Y\}$ 与 $\{C, \rho, g\}$ 为单位组, 对式 (17) 进行无量纲化处理, 函数只有 2 个无量纲组, 因此函数只有 1 个自变量和因变量, 可以得到 2 个无量纲函数关系分别为:

$$\frac{\rho V}{m} \left(\frac{Y}{\rho U^2}\right)^{\frac{3\mu}{2}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{3\nu-1+\frac{3\mu}{2}} = f\left(\frac{ga}{U^2} \left(\frac{\rho U^2}{Y}\right)^{\frac{2+\mu}{2}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^\nu\right) \tag{18}$$

$$\frac{\rho V}{m} \left(\frac{ga}{U^2}\right)^{\frac{3\mu}{2+\mu}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{6\nu-2-\mu}{2+\mu}} = f\left(\frac{Y}{\rho U^2} \left(\frac{ga}{U^2}\right)^{\frac{-2}{2+\mu}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{2\nu}{2+\mu}}\right) \tag{19}$$

在强度体系中, 重力效应可以忽略, 式 (18) 的右边是一个常数 $f(0)$, 在强度机理下, 式 (18) 可写为:

$$V \propto \frac{m}{\rho} \left(\frac{Y}{\rho U^2}\right)^{-\frac{3\mu}{2}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{1-3\nu+\frac{3\mu}{2}} \tag{20}$$

因此, 弹坑体积必须与撞击速度的 3μ 次方、与弹丸半径的 3 次方、与材料强度的 $-3\mu/2$ 次方成正比。同样地, 忽略式 (19) 中的强度, 重力机理下成坑体积相似, 式 (19) 变为:

$$V \propto \frac{m}{\rho} \left(\frac{ga}{U^2}\right)^{\frac{-3\mu}{2+\mu}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{6\nu-2-\mu}{2+\mu}} \tag{21}$$

类似的方法可以用于任何其他感兴趣的成坑变量相似结果, 如表 2 所示。

表 2 强度和重力机理控制下成坑变量相似律

Table 2 Summary of cratering variables scaling in strength and gravity regimes

成坑结果	一般形式相似	点源, 强度区间(假设 $Y \gg \rho ga$)	点源, 重力区间(假设 $\rho ga \gg Y$)
体积 V	$\frac{\rho V}{m} = f\left(\frac{ga}{U^2}, \frac{Y}{\rho U^2}\right)$	$V \propto \frac{m}{\rho} \left(\frac{Y}{\rho U^2}\right)^{-\frac{3\mu}{2}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{1-3\nu+\frac{3\mu}{2}}$	$V \propto \frac{m}{\rho} \left(\frac{ga}{U^2}\right)^{\frac{-3\mu}{2+\mu}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{2+\mu-6\nu}{2+\mu}}$
半径 R	$R \left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} = f\left(\frac{ga}{U^2}, \frac{Y}{\rho U^2}\right)$	$R \left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} \propto \left(\frac{Y}{\rho U^2}\right)^{-\frac{\mu}{2}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{1}{3}-\nu+\frac{\mu}{2}}$	$R \left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} \propto \left(\frac{ga}{U^2}\right)^{\frac{-\mu}{2+\mu}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{2+\mu-6\nu}{3(2+\mu)}}$
深度 h	$h \left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} = f\left(\frac{ga}{U^2}, \frac{Y}{\rho U^2}\right)$	$h \left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} \propto \left(\frac{Y}{\rho U^2}\right)^{-\frac{\mu}{2}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{1}{3}-\nu+\frac{\mu}{2}}$	$h \left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} \propto \left(\frac{ga}{U^2}\right)^{\frac{-\mu}{2+\mu}} \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{\frac{2+\mu-6\nu}{3(2+\mu)}}$

3.3.2 强度机理到重力机理的转换

如图 12 所示, 在强度体系中, 随着弹丸尺寸的增大, 成坑效率 Π_V 是不变的, 但与撞击速度有关, 速度越大效率越高。在重力作用下, 成坑效率 Π_V 随撞击物尺寸的增大而减小, 下降的指数通常用 α 表示, 记 $\alpha = 3\mu/(2+\mu)$ 。已知率无关材料分别在强度和重力机理控制下成坑体积的函数形式, 则重力和强度机理之间的转换段经验函数形式通常取为:

$$\Pi_V = K_1 \left[\Pi_2 \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} + (K_2 \Pi_3)^{\frac{2+\mu}{2}} \right]^{-\alpha} \quad (22)$$

式中: K_1 、 K_2 为与材料相关的常数。记 $\bar{Y} = K_2 Y$, $\bar{\Pi}_3 = \bar{Y}/\rho U^2$, 式 (22) 可以进一步简化为:

$$\Pi_V = K_1 \left[\Pi_2 \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} + (\bar{\Pi}_3)^{\frac{2+\mu}{2}} \right]^{-\alpha} \quad (23)$$

当 $\Pi_2 = (K_2 \Pi_3)^{\frac{2+\mu}{2}}$ 或 $\Pi_2 = (\bar{Y}/\rho U^2)^{3\mu/2}$, 成坑机理在由强度向重力控制间转换^[53]。也有学者认为, 当 $\bar{Y} = 0.8K_2 Y$, 成坑机理在强度与重力控制间转换^[78]。常见地质材料耦合参数指数和成坑体积相似律结果如表 3 所示^[53]。

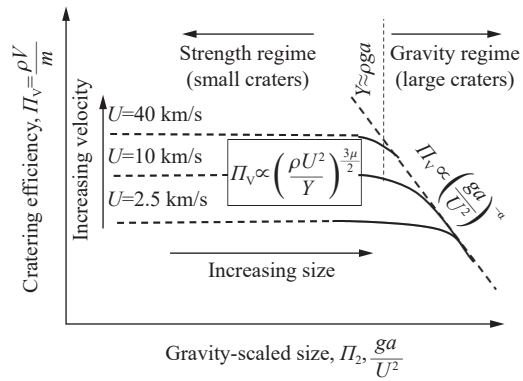


图 12 成坑效率 Π_V 与 Π_2 大小的关系示意图^[53]
Fig. 12 Schematic illustration of cratering efficiency Π_V depends on Π_2 ^[53]

表 3 各种地质材料地质材料耦合参数指数和成坑体积相似律^[53]

Table 3 Coupling parameter exponent of various geological materials and scaling law of crater volume^[53]

材料	相似指数 α	相似指数 μ	K_1	\bar{Y}/MPa	强度区间 ¹⁾	重力区间 ¹⁾	强度向重力机理转换的冲击器直径/ m^2
砂	0.51	0.41	0.24	0	—	$V = 0.14m^{0.83}g^{-0.51}U^{1.02}$	接近 0
干土	0.51	0.41	0.24	0.18	$V = 0.04mU^{1.23}$	$V = 0.14m^{0.83}g^{-0.51}U^{1.02}$	0.2
湿土	0.65	0.55	0.20	0.14	$V = 0.05mU^{1.65}$	$V = 0.60m^{0.783}g^{-0.65}U^{1.3}$	1.2
水	0.648	0.55	2.30	0	—	$V = 13.0m^{0.783}g^{-0.65}U^{1.3}$	接近 0
软岩	0.65	0.55	0.20	7.6	$V = 0.009mU^{1.65}$	$V = 0.48m^{0.783}g^{-0.65}U^{1.3}$	11
硬岩	0.60	0.55	0.20	18	$V = 0.005mU^{1.65}$	$V = 0.48m^{0.783}g^{-0.65}U^{1.3}$	32

1) 弹丸的质量 m 的单位是 kg, 速度 U 的单位是 km/s, 成坑体积 V 的单位是 m^3 ; 2) 地球加速度下 10 km/s 冲击。

4 总结与展望

本文中介绍了陨石成坑的物理过程, 主要包括接触压缩、开挖和调整 3 个阶段, 分析了简单坑和复杂坑的形成过程。指出了天体碰撞与实验室模型碰撞实验成坑现象的不同, 天体碰撞事件剪切抛射主导成坑过程, 但对于固体、脆性的地质材料的超高速撞击实验, 层裂主导成坑结果。离心机实验可以模拟大尺度陨石坑形成的物理过程, 但碰撞速度远低于天体碰撞速度。推导了碰撞成坑一般相似律模型和点源相似下的成坑模型律。地质材料在强度机理和重力机理分别控制下的成坑相似律模型已经非常成熟, Holsapple 等提出并发展的“点源模型”得到公认并被广泛使用。但点源成坑相似律是基于球形弹丸在正碰撞半无限连续介质靶板条件下得到的, 但实际天体碰撞有许多复杂因素的存在, 目前尚未量化, 需进一步研究。另外, 成坑相似模型对碰撞问题物理过程并不十分关注, 只分析了碰撞结果如成坑体积、半径、抛射物分布等和初始碰撞参数间的关系, 少见理论分析模型的建立, 模型均有一定的适用范围。碰撞成坑新的研究方向主要有以下 5 类: (1) 点源假设不适用的近距离的碰撞模型; (2) 熔化气化、大气层效应和温度对成坑过程的影响; (3) 斜撞击成坑规律与模型; (4) 碰撞的动量增强效应; (5) 模拟形成陨石坑的实验和数值计算方法。

参考文献:

- [1] MARUYAMA S, EBISUZAKI T. Origin of the Earth: A proposal of new model called ABEL [J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(2): 253–274. DOI: 10.1016/j.gsf.2016.10.005.
- [2] PELTON J N, ALLAHDADI F. Handbook of cosmic hazards and planetary defense [M]. London: Springer, 2015: 5–13.

- [3] ALVAREZ W. Comparing the evidence relevant to impact and flood basalt at times of major mass extinctions [J]. *Astrobiology*, 2003, 3(1): 153–161. DOI: 10.1089/153110703321632480.
- [4] 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.
- [5] SCHULTE P, ALEGRET L, ARENILLAS I, et al. The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary [J]. *Science*, 2010, 327(5970): 1214–1218. DOI: 10.1126/science.1177265.
- [6] HESTROFFER D, SÁNCHEZ P, STARON L, et al. Small solar system bodies as granular media [J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2019, 27(1): 6. DOI: 10.1007/s00159-019-0117-5.
- [7] 柳森, 党雷宁, 赵君尧, 等. 小行星撞击地球的超高速问题 [J]. *力学学报*, 2018, 50(6): 1311–1327. DOI: 10.6052/0459-1879-18-313.
- LIU S, DANG L N, ZHAO J Y, et al. Hypervelocity issues of earth impact by asteroids [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(6): 1311–1327. DOI: 10.6052/0459-1879-18-313.
- [8] SHOEMAKER E M, WEISSMAN P R, SHOEMAKER C S. The flux of periodic comets near Earth [M]. Arizona: University of Arizona Press, 1994: 313–335.
- [9] BLAND P A, ARTEMIEVA N A. Efficient disruption of small asteroids by Earth's atmosphere [J]. *Nature*, 2003, 424(6946): 288–291. DOI: 10.1038/nature01757.
- [10] WANG X Y, LUO L, GUO H D, et al. Cratering process and morphological features of the Xiuyan impact crater in Northeast China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(10): 1629–1638. DOI: 10.1007/s11430-013-4695-1.
- [11] 陈鸣, 谢先德, 肖万生, 等. 依兰陨石坑: 我国东北部一个新发现的撞击构造 [J]. *科学通报*, 2020, 65(10): 948–954. DOI: 10.1360/TB-2019-0704.
- CHEN M, XIE X D, XIAO W S, et al. Yilan crater, a newly identified impact structure in northeast China [J]. *China Science Bulletin*, 2020, 65(10): 948–954. DOI: 10.1360/TB-2019-0704.
- [12] OSINSKI G R, PIERAZZO E. Impact cratering: processes and products [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.
- [13] 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.
- [14] DYPVIK H, PLADO J, HEINBERG C, et al. Impact structures and events: a Nordic perspective [J]. *Episodes*, 2008, 31(1): 107–114. DOI: 10.18814/epiiugs/2008/v31i1/015.
- [15] PLADO J. Meteorite impact craters and possibly impact-related structures in Estonia [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2012, 47(10): 1590–1605. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2012.01422.x.
- [16] GAULT D E, QUAIDE W L, OBERBECK V R. Impact cratering mechanics and structures [M]//FRENCH B M, SHORT N M. Shock Metamorphism of Natural Materials. Mono Book Corporation, 1968: 23–24.
- [17] MELOSH H J. Impact cratering: a geologic process [M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [18] 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.
- [19] OSINSKI G R, TORNABENE L L, GRIEVE R A F. Impact ejecta emplacement on terrestrial planets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310(3–4): 167–181. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.08.012.
- [20] KIEFFER S W, SIMONDS C H. The role of volatiles and lithology in the impact cratering process [J]. *Reviews of Geophysics*, 1980, 18(1): 143–181. DOI: 10.1029/RG018i001p00143.
- [21] O'KEEFE J D, AHRENS T J. Cometary and meteorite swarm impact on planetary surfaces [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, 87(B8): 6668–6680. DOI: 10.1029/JB087iB08p06668.
- [22] PIERAZZO E, MELOSH H J. Melt production in oblique impacts [J]. *Icarus*, 2000, 145(1): 252–261. DOI: 10.1006/icar.1999.6332.
- [23] AHRENS T J, O'KEEFE J D. Shock melting and vaporization of Lunar rocks and minerals [J]. *The Moon*, 1972, 4(41): 214–249. DOI: 10.1007/bf00562927.
- [24] DENCE M R. The extraterrestrial origin of Canadian craters [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1965, 123(2): 941–969. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1965.tb20411.x.

- [25] TURTLE E P, PIERAZZO E, COLLINS G S, et al. Impact structures: what does crater diameter mean? [M]. Portland: The Geological Society of America, 2005: 1–24. DOI: 10.1130/0-8137-2384-1.1.
- [26] MELOSH H J, IVANOV B A. Impact crater collapse [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1999, 27(1): 385–415. DOI: 10.1146/annurev.earth.27.1.385.
- [27] PIKE R J. Control of crater morphology by gravity and target type: Mars, Earth, Moon. [C]// 11th Lunar and Planetary Science Conference. New York, USA: Pergamon Press, 1980.
- [28] PIKE R J. Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the moon [M]. New York, USA: Pergamon Press, 1977: 489–509.
- [29] PILKINGTON M, GRIEVE R A F. The geophysical signature of terrestrial impact craters [J]. *Reviews of Geophysics*, 1992, 30(2): 161–181. DOI: 10.1029/92RG00192.
- [30] OSINSKI G R, BUNCH T E, FLEMMING R L, et al. Impact melt- and projectile-bearing ejecta at Barringer Crater, Arizona [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 432: 283–292. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.10.021.
- [31] GRIEVE R A F, GARVIN J B. A geometric model for excavation and modification at terrestrial simple impact craters [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B13): 11561–11572. DOI: 10.1029/JB089iB13p11561.
- [32] TREDoux M, HART R J, CARLSON R W, et al. Ultramafic rocks at the center of the Vredefort structure: further evidence for the crust on edge model [J]. *Geology*, 1999, 27(10): 923–926.
- [33] 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.
- [34] CLARKE J, KNIGHTLY P, RUPERT S. Melt-water formed dark streaks on slopes of Haughton crater as possible Mars analogues [J]. *International Journal of Astrobiology*, 2019, 18: 518–526. DOI: 10.1017/S1473550418000526.
- [35] 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.
- [36] STÖFFLER D, GAULT D E, WEDEKIND J, et al. Experimental hypervelocity impact into quartz sand: distribution and shock metamorphism of ejecta [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(29): 4062–4077. DOI: 10.1029/jb080i029p04062.
- [37] GAULT D E, WEDEKIND J A. Experimental impact “craters” formed in water: gravity scaling realized [J]. *Eos, Transactions-American Geophysical Union*, 1978, 59(12): 1121.
- [38] KENKMANN T, DEUTSCH A, THOMA K, et al. The MEMIN research unit: Experimental impact cratering [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(1): 1–2. DOI: 10.1111/maps.12035.
- [39] EBERT M, HECHT L, DEUTSCH A, et al. Geochemical processes between steel projectiles and silica-rich targets in hypervelocity impact experiments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 133: 257–279. DOI: 10.1016/j.gca.2014.02.034.
- [40] HARRISS K H, BURCHELL M J. Hypervelocity impacts into ice-topped layered targets: Investigating the effects of ice crust thickness and subsurface density on crater morphology [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2017, 52(7): 1505–1522. DOI: 10.1111/maps.12913.
- [41] HOLSAPPLE K A, SCHMIDT R M. On the scaling of crater dimensions: 1. explosive processes [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1980, 85(B12): 7247–7256. DOI: 10.1029/JB085iB12p07247.
- [42] SUN Y H, SHI C C, LIU Z, et al. Theoretical research progress in high-velocity/hypervelocity impact on semi-infinite targets [J]. *Shock and Vibration*, 2015, 2015: 265321. DOI: 10.1155/2015/265321.
- [43] 李卧东, 王明洋, 施存程, 等. 地质类材料超高速撞击相似关系与实验研究综述 [J]. *防护工程*, 2015, 37(2): 55–62.
LI W D, WANG M Y, SHI C C, et al. Review of similarity laws and scaling experiments research of hypervelocity impact on geological material targets [J]. *Protective Engineering*, 2015, 37(2): 55–62.
- [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. An introduction to the dynamics of hypervelocity collisions [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [45] HOERTH T, SCHAEFER F, THOMA K, et al. Hypervelocity impacts on dry and wet sandstone: observations of ejecta dynamics and crater growth [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(1): 23–32. DOI: 10.1111/maps.12044.

- [46] 经福谦. 超高速碰撞现象 [J]. *爆炸与冲击*, 1990, 10(3): 279–288.
JING F Q. Hypervelocity impact phenomena [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1990, 10(3): 279–288.
- [47] 王马法, 周智炫, 黄洁, 等. 镁合金弹丸 10 km/s 撞击铝靶成坑特性实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(5): 053302. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0129.
WANG M F, ZHOU Z X, HUANG J, et al. Experiment on crater characteristics of aluminium targets impacted by magnesium projectiles at velocities of about 10 km/s [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(5): 053302. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0129.
- [48] 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.
- [49] POELCHAU M H, KENKMANN T, THOMA K, et al. The MEMIN research unit: Scaling impact cratering experiments in porous sandstones [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(1): 8–22. DOI: 10.1111/maps.12016.
- [50] DUFRESNE A, POELCHAU M H, KENKMANN T, et al. Crater morphology in sandstone targets: The MEMIN impact parameter study [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(1): 50–70. DOI: 10.1111/maps.12024.
- [51] BUHL E, POELCHAU M H, DRESEN G, et al. Deformation of dry and wet sandstone targets during hypervelocity impact experiments, as revealed from the MEMIN Program [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(1): 71–86. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2012.01431.x.
- [52] HOLSAPPLE K A, HOUSEN K R. Momentum transfer in asteroid impacts. I. theory and scaling [J]. *Icarus*, 2012, 221(2): 875–887. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.09.022.
- [53] HOLSAPPLE K A. The scaling of impact processes in planetary sciences [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21(1): 333–373. DOI: 10.1146/annurev.earth.21.050193.002001.
- [54] HOLSAPPLE K A, SCHMIDT R M. Point-Source solutions and coupling parameters in cratering mechanics [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1987, 92(B7): 6350–6376. DOI: 10.1029/JB092iB07p06350.
- [55] HOLSAPPLE K A, SCHMIDT R M. On the scaling of crater dimensions: 2. impact processes. [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1982, 87(B3): 1849–1870. DOI: 10.1029/jb087ib03p01849.
- [56] HOUSEN K R, SCHMIDT R M, HOLSAPPLE K A. Crater ejecta scaling laws: Fundamental forms based on dimensional analysis [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1983, 88(B3): 2485–2499. DOI: 10.1029/JB088iB03p02485.
- [57] KENKMANN T, DEUTSCH A, THOMA K, et al. Experimental impact cratering: A summary of the major results of the MEMIN research unit [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2018, 53(8): 1543–1568. DOI: 10.1111/maps.13048.
- [58] 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.
- [59] SEDGWICK R T. Numerical techniques for modeling high velocity penetration and perforation processes [J]. 1980, 5: 253–272. DOI: 10.1016/B978-0-444-41928-6.50016-8.
- [60] 向家琳. 金属材料可压缩性效应对超高速碰撞中厚靶成坑的影响 [D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1990.
XIANG J L. Effect of compressibility of metal materials on craters of thick targets in hypervelocity collision [D]. Beijing: Institute of mechanics, Chinese Academy of Science, 1990.
- [61] 罗忠文. 金属材料超高速碰撞的数值模拟 [D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1990.
LUO Z W. Numerical simulation of hypervelocity impact of metallic materials [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, 1990.
- [62] CHRISTIANSEN E L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14(1–4): 145–156. DOI: 10.1016/0734-743x(93)90016-z.
- [63] SUMMERS J L, CHARTERS A C. High speed impact of metal projectiles in targets of various materials [C]// Proceedings of the 3rd Symposium on Hypervelocity Impact. Chicago, USA, 1958.
- [64] BRUCE E P. Review and analysis of high velocity impact data [C]// Proceedings of the 5th Symposium on Hypervelocity Impact. Denver, Colorado, USA: Defense Technical Information Center, 1961.
- [65] WALSH J. On the theory of hypervelocity impact [C]// 7th Symposium on Hypervelocity Impact. Florida, USA, 1964.
- [66] CHRISTMAN D R, GEHRING J W. Analysis of high-velocity projectile penetration mechanics [J]. *Journal of Applied*

- Physics*, 1966, 37(4): 1579–1587. DOI: 10.1063/1.1708570.
- [67] CHARTERS A C, SUMMERS J L. Some comments on the phenomena of high speed impact [C]// Proceedings of the Dicennial Symposium. White Oak, Maryland, USA: US Naval Ordnance Laboratory, 1959.
- [68] EICHELBERGER R J, Gehring J. W. Effects of Meteoroid Impacts on space vehicles [J]. *ARS Journal*, 1962, 32(10): 1583–1591. DOI: 10.2514/8.6339.
- [69] YU S B, SUN G C, TAN Q M. Experimental laws of cratering for hypervelocity impacts of spherical projectiles into thick target [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(1): 67–77. DOI: 10.1016/s0734-743x(05)80007-7.
- [70] HERRMANN W, JONES A. Correlation of hypervelocity impact data [C]// The Fifth Symposium on Hypervelocity Impact. Denver, Colorado, USA, 1961.
- [71] 周劲松, 甄良, 杨德庄. 几种金属材料在 2.6~7 km/s 弹丸撞击下的损伤行为 [J]. *宇航学报*, 2000(2): 75–81. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1328.2000.02.012.
ZHOU J S, ZHEN L, YANG D Z. Damage behaviors of several metal materials under impacts of projectiles with hypervelocities of 2.6–7 km /s [J]. *Journal of Astronautics*, 2000(2): 75–81. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1328.2000.02.012.
- [72] HOLSAPPLE K A, SCHMIDT R M. A material-strength model for apparent crater volume [C]// Proceedings of the 10th Lunar and Planetary Science Conference. 1979.
- [73] HOLSAPPLE K A. Material strength and explosive property effects in cratering and ground shock [C]// The Sixth International Symposium of Blast Simulation. Cahors, France: Centre D' Etudesde Gramat, 1979.
- [74] HOLSAPPLE K A. The scaling of impact phenomena [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, 5(1–4): 343–355. DOI: 10.1016/0734-743X(87)90051-0.
- [75] 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.
- [76] ÖPIK E J. Meteor impact on solid surface [J]. *Irish Astronomical Journal*, 1958, 5(1): 14–33.
- [77] 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.
- [78] ASPHAUG E, MOORE J M, MORRISON D, et al. Mechanical and geological effects of impact cratering on Ida [J]. *Icarus*, 1996, 120(1): 158–184. DOI: 10.1006/icar.1996.0043.

(责任编辑 王易难)