

小行星撞遇陆地成坑动力学的计算模拟

徐文杰¹, 刘芹芹^{2,3}, 申旭辉^{2,3}

(1. 清华大学 水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084; 2. 中国科学院 国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院 国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室, 北京 100190)

摘要: 小行星撞遇陆地是一个复杂的非线性动力学过程, 难以通过模型试验的方法开展相关研究。数值计算为这一灾害动力学过程分析提供了重要的工具, 基于自主研发的CoSim软件中离散元(Discrete Element Method, DEM)模块初步实现了小行星撞遇陆地的大规模计算模拟。基于小行星撞遇陆地三维动力学全过程的数值仿真结果: 实现了初始接触、撞遇挖掘、高速抛射和回落调整4个撞击阶段全过程仿真; 小行星的碰撞入射角及撞遇过程中动力学行为将影响撞击坑的地形地貌特征。研究也表明大规模数值计算方法可较好地实现小行星撞遇地球这一动力学过程, 为小行星防御提供支撑。

关键词: 小行星; 撞击坑; 离散元法; 数值仿真

中图分类号: P185.7, K826.14

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)02-0195-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230060

引用格式: 徐文杰, 刘芹芹, 申旭辉. 小行星撞遇陆地成坑动力学的计算模拟[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(2): 195-202.

Reference format: XU W J, LIU Q Q, SHEN X H. Computational simulation of the dynamics of craters formed by asteroid collisions with land[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(2): 195-202.

引言

行星撞击是太阳系早期重要的地质过程, 这种撞击作用伴随着地球的形成和演化过程。这些来自太阳系的地外星体, 在撞击地球时有的在穿越大气层过程中就已摩擦燃烧、甚至空爆解体, 有的则穿越大气层后高速撞遇地球的陆地或海洋, 形成撞击坑或海啸。地外星体的撞击, 对地球早期的形成、地质作用及生物演化发挥了重要的作用^[1], 在撞击事件过程中形成的撞击坑, 大部分随着地球的演化过程而难以辨识甚至消失, 或者位于海洋而难以发现, 目前全世界已经发现的大型撞击坑有134个(图1)^[2]。基于GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)卫星重力测量结果, 在南极洲东部威尔克斯地的冰层下面发现直径约500 km的撞击坑^[3], 其形成于约2.5亿年前一个直径约48 km的小行星撞遇地球, 这次撞遇事件造成了全球95%海洋生物和70%陆地动物的灭绝, 同时也导致冈瓦纳大陆开始分裂以及恐龙的诞生。而6500万年前一颗直径约10 km的小行星撞遇墨西哥湾, 形成一个直径约180 km的撞击坑, 此次撞击也造

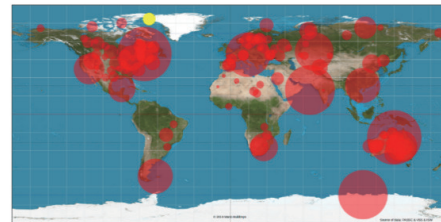


图1 全球已发现的撞击坑分布图^[2]

Fig. 1 Distribution map of discovered impact craters worldwide^[2]

成了地球环境的剧烈变化, 是导致恐龙等大批物种灭绝的重要原因。

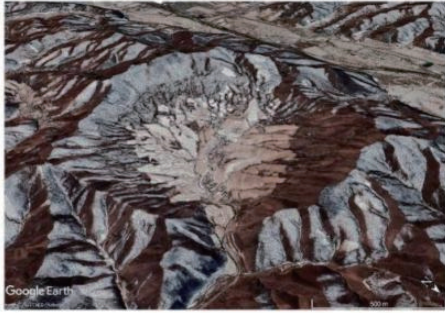
目前中国大陆共发现两处撞击坑, 分别为位于辽宁的岫岩陨石坑^[4-5]和黑龙江的依兰陨石坑^[6-7]。其中, 岫岩陨石坑是中国首个被证实的陨石坑(图2), 呈碗状直径约1800 m, 坑深约150 m, 坑区基岩为早元古代变质岩地层(距今约20亿年)。

已有研究表明, 近2.9亿年里地球遭受的小天体撞击频率是之前的2.6倍^[6], 而这种撞击作用在现在及未来会一直持续存在。高速运动的地外星体在撞击地球的过程中, 一部分未达到地面就发生空爆, 形成超高

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-07-08

基金项目: 中国国家航天局前期研究计划(KJSP2020020101); 国家国防科技工业局项目(KJSP2020020303); 中国科学院国家科学中心九章人才计划(E3RC2TQ5, E3RC2TQ4); 国家自然科学基金(52079067)

压冲击波。如2013年2月15日,一颗直径约20 m的小行星进入大气层后,在俄罗斯车里雅宾斯克上空约30 km发生空爆,形成巨大的冲击波,导致1 000多人受伤。有的则穿越大气层“撞遇”地表,如1908年6月30日发生在俄罗斯西伯利亚的通古斯爆炸事件,相当于1 000万t TNT爆炸的能量,撞击坑周边2 000多km²的植被成辐射状倒伏^[4];2021年青海玉树火流星,火球爆炸产生的近地表大气冲击波约2 min后到达地面,被中国地震台网监测到,囊谦公安局所在地也感受到了爆炸产生的声音和震动^[8]。地外星体在撞遇陆地成坑过程产生3种撞击效应,即撞击波动、撞击高压变质、撞击溅射^[8],使得这一灾害过程极为复杂。近些年来,近地小行星的防御在国际上已经成为一个重大课题。



注:来源于GoogleEarth。

图2 辽宁岫岩撞击坑卫星影像

Fig. 2 Satellite image of Xiuyan impact crater in Liaoning province

由于地外星体撞遇地球属于高速动力学过程,难以采用模型试验的方式开展相关研究工作。近些年来,随着数值计算技术的飞速发展,为此类研究提供了重要的手段。Ezzedine等^[9]基于浅水波法对行星撞遇海洋时产生的涌浪过程进行了模拟。Neill等^[10]采用数值计算对地球冥古宙时期的撞击事件研究,结果表明巨大撞击事件产生的热异常会诱导地幔驱动瞬时俯冲事件活动。Collins等^[11]采用任意拉格朗日-耦合(Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)法对墨西哥尤卡坦半岛的希克苏鲁伯陨石坑模拟研究指出,该撞击坑是从东北方向进行的高角度撞击(与水平方向成45°~60°)。Yang^[12]采用时-空守恒元解元方法(Conservation Element and Solution Element, CESE)开展了二维撞击数值计算研究,并与室内模型试验进行对比,表明撞击坑的直径和深度随着撞击速度及温度的增加而增加。黄川等^[13]模拟了小行星撞击对地球地幔对流的影响。纵观现有可查的文献资料,目前对小行星撞遇地球的动力过程研究成果相对较少,数值计算作为一种重要的研究手段,但在算法方面依然处

于初步研究和探索阶段。因此,发展高效、可靠的数值分析方法及软件,实现小行星防御及撞遇地球动力学演化过程的精细化计算分析,对加快推进小行星防御研究具有重要的理论和实践意义。

地外星体撞击对地球的破坏性威胁虽然是小概率事件,但在当今人类社会极有可能给人类产生巨大的灾害。因此,开展地外星体撞遇地球灾害动力学过程及分析方法研究,对于防御极端灾害事件及研究地球形成和演化具有重要的意义。从目前的研究来看,一方面尚处于起步探索阶段,成果较少;另一方面,方法上基本以连续介质力学为主,而高速撞击是一个强非连续、非线性问题,需要发展新的方法。本文将以离散元方法(Discrete Element Method, DEM)为基础,采用自主研发的高性能计算平台CoSim,开展地外星体撞遇地球陆地的动力学过程及分析方法研究,为该领域研究及防灾减灾提供支撑。

1 离散元法

DEM最早是Cundall等^[14]为解决岩土工程的大变及破坏问题而提出一种非连续介质力学分析方法,并逐渐被应用至颗粒材料、岩土体变形破坏及崩塌、滑坡等领域。DEM是基于牛顿第二定律和有限差分的显式迭代算法,将计算域离散为一系列刚性颗粒构成的系统,颗粒间根据嵌入接触计算彼此之间的接触力(图3)。在每个时间步内,每个颗粒需进行接触检测,计算接触力和接触力矩,更新颗粒位置和速度。接触检测分为三步,首先粗接触检测,得到该颗粒周围的颗粒。其次细接触检测,计算得到接触点、接触法线方向、嵌入深度,用于下一步的接触力和接触力矩求解。最后,分别对接触力和接触力矩求和,基于牛顿第二定律进行插值,更新颗粒的速度和位置

$$\mathbf{F}^n = k_n \mathbf{u}^n \mathbf{n} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}^s = \{\mathbf{F}^s\}_{\text{update}} + k_t \Delta \mathbf{u}^t \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \{\mathbf{M}\}_{\text{update}} + k_r \Delta \omega^t \quad (3)$$

其中: \mathbf{F}^n 、 \mathbf{F}^s 和 \mathbf{M} 分别为法向接触力、切向接触力及弯矩; \mathbf{n} 为相邻两个颗粒间的接触法向; $\Delta \mathbf{u}^t$ 为颗粒间相对位移增量; \mathbf{u}^n 为颗粒间沿法向的嵌入深度; $\Delta \omega^t$ 为颗粒间旋转角度增量; k_n 、 k_t 和 k_r 分别为法向刚度、切向刚度及旋转刚度。

为表征地球表层岩石及小行星的力学行为及撞击

断裂破碎过程, 采用CoSim-DEM中的粘结断裂接触本构模型(图3)。在粘结断裂接触本构模型中, 相邻的粘结球颗粒之间发生破坏主要有两种方式: 拉伸破坏和剪切破坏。对于处于粘结状态的两颗粒, 如果颗粒间的拉力超过最大拉力 $F_{n,max}$, 粘结接触对发生拉伸破坏; 如果颗粒间的剪力超过最大剪力 $F_{s,max}$, 粘结接触对发生剪切破坏

$$F_{n,max} = \min(\sigma_{n,A}r_A^2, \sigma_{n,B}r_B^2) \quad (4)$$

$$F_{s,max} = \begin{cases} \min(\sigma_{s,A}r_A^2, \sigma_{s,B}r_B^2) + \|F_n^t \tan \varphi^s\|, & u_n \geq 0 \\ \min(\sigma_{s,A}r_A^2, \sigma_{s,B}r_B^2) - \|F_n^t \tan \varphi^s\|, & u_n < 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中: σ_n 和 σ_s 分别是法向和切向接触粘结强度; 下标A和B代指两颗粒。

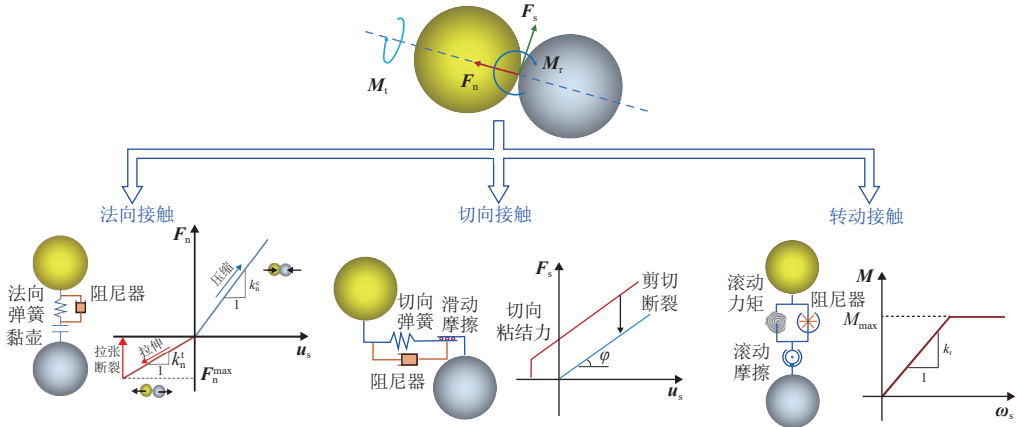


图 3 球颗粒间粘结断裂接触模型

Fig. 3 Cohesive Fracture Model (CFM) between spherical particles

2 基于GPU并行加速的DEM

DEM的迭代计算采用动态松弛法, 按照计算顺序可分为: 邻居搜索、接触检测、接触模型和时间积分^[15-16]。当颗粒规模达到百万量级后, 需要完成多达百万次迭代计算才能模拟一个时间步的计算, 非常耗时。但在同一时刻下, 离散颗粒的迭代计算是相对独立的。因此, 为提高DEM大规模、高效计算分析, CoSim-DEM中采用基于CUDA的GPU并行加速算法。CUDA作为一种数据并行计算平台和编程模型, 不要求开发者操纵GPU中复杂的图形或图形基元, 使得GPU与其它可编程设备一样, 简化基于GPU的DEM代码的实现。

基于GPU-CUDA架构下CoSim-DEM的计算流程图如图4所示。主机端即CPU主要任务是模拟数据的初始化和输出(包括颗粒和边界的几何信息和材料信息、颗粒速度位置、颗粒数量、邻居搜索设置、计算设置和接触模型设置等)、CPU端与GPU端数据传输、分配计算任务如设置邻居搜索和接触检测方法等, 而设备端即GPU负责运行计算任务对应的内核函数: 邻居搜索、接触检测、接触力/力矩计算和插值计算更新颗粒速度和位置。

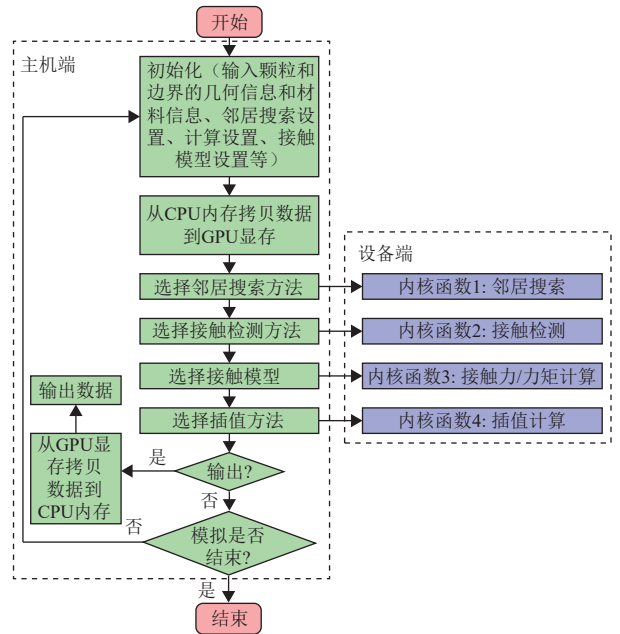


图 4 CoSim-DEM算法流程图

Fig. 4 Algorithm flowchart of CoSim-DEM

3 小行星撞遇陆地模拟分析

基于上述自主开发的CoSim软件开展小行星撞遇地球的全过程模拟分析。模拟直径为2 m的球状小行星以600 m/s速度撞遇陆地, 陆地岩石模型尺寸20 m ×

20 m × 10 m。小行星采用3~4 cm密集堆积的球颗粒集进行表征,共12 112个球颗粒;陆地岩石采用3~6 cm密集堆积的球颗粒集表征,共4 878 232个球颗粒。离散元数值计算模型如图5所示。关于小行星强度参数目前的研究成果相对较少,根据Popova等^[17]对陨石调查表明其密度在2.3~3.6 g/cm³、抗压强度在20~450 MPa、抗拉强度在6~42 Mpa。根据地球表层风化层的影响,地表岩土体强度相对较低,因此本文在研究过程中粘结强度取岩石相应参数的10倍,摩擦夹角也高于陆地岩土体。此外,为了模拟小行星撞遇陆地时入射角对撞击坑的影响,分别对垂直入射以及45°角入射两种工况进行了模拟分析。

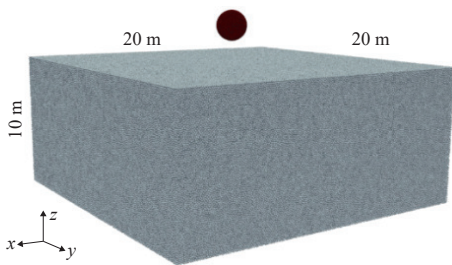


图5 小行星撞遇陆地离散元数值计算模型

Fig. 5 DEM numerical model of asteroid impacting the land

计算采用球颗粒的粘结断裂接触模型,表1显示了DEM数值计算采用的颗粒间细观接触参数表。计算中采用重力加速度9.8 m/s²、阻尼0.01、侧向及底部采用截断滑移边界。同时,在计算中暂不考虑热效应及空气动力学效应。

表1 DEM数值计算采用的颗粒细观接触参数表

Table 1 Table of particle microscopic contact parameters used in numerical calculation

属性参数	地表岩土体	小行星
密度/(kg·m ⁻³)	2 800	3 500
弹性模量/GPa	5	20
泊松比	0.1	0.1
粘结强度/Mpa	切向	500
	法向	750
摩擦角/(°)	静摩擦	40
	动摩擦	20

3.1 小行星垂直入射

小行星在高速撞遇陆地时在高压差作用下有的会发生爆炸,为研究小行星撞遇陆地时是否发生爆炸对撞击坑的影响,在垂直入射工况分析时将同时考虑小行星是否爆炸两种工况。

为实现小行星的撞遇地球爆炸模拟,假定起爆点位于小行星中心一定的范围内,起爆时间为小行星的

一半侵入地球(即球体中心到达初始地表位置)。以小行星的中心为原点,选取半径为15 cm范围内的球颗粒每隔0.2 ms半径膨胀1.1倍,连续膨胀10次后球颗粒半径,还原为初始半径。从而通过上述设置,在小行星中心范围内产生强大的膨胀压力,以模拟其爆炸过程。

采用CoSim-DEM计算得到的小行星垂直入射时,撞击坑的形成过程如图6所示,可以看出小行星撞遇陆地是否爆炸对撞击坑形成有一定的影响,总体上大致可以划分为4个阶段(图7)。

初始接触阶段(图6(a)):小行星撞遇地表后将在陆地岩体内部形成强大的冲击波,并从撞遇点向周围高速传播,从而产生振动效应(图7(a))。

撞遇挖掘阶段(图6(b)):若小行星在撞遇过程不发生爆炸,受高速撞击力的作用将发生破裂解体。在垂直入射过程中撞击坑中心主要是垂直运动为主,垂直向下挤压成坑需要的荷载较周围大,这导致高速解体的小行星其运动将呈现从中心向四周高速扩散挤压为主(图6(c)),其结果使得周围向下运动速度快;随着大量小行星物质逐渐扩散至四周,中心部位逐渐减少,同时受四周挤压作用撞击坑中心部位逐渐由向下运动转换为上升运动(图6(c)、图7(b)),形成的冲击坑类似于“复杂冲击坑”。与此同时,这一阶段由于受到撞遇过程中高温、高压的作用,撞击坑附近的岩石将发生不同程度的熔融和变质作用。

若小行星在撞遇过程中发生爆炸,在爆炸荷载作用下,在陆地岩石产生更为强大的冲击波(图6(c));在巨大冲击波的作用下,冲击坑的中心部位的岩体被持续向下“挖掘”,而未见明显的“凸起”;形成的冲击坑范围及深度均超过小行星不发生爆炸工况;形成的冲击坑类似于“简单冲击坑”。

高速抛射阶段(图6(d)):随着撞遇挖掘的进一步发展,撞击坑处大量的陆地岩石(部分被熔融)、小行星物质等在冲击过程中被高速抛射至撞击坑周围的高空(图7(c))。发生爆炸小行星产生的碎片及陆地岩石的抛射物质及抛射速度明显高于未发生爆炸工况,从而给周围及环境产生更大的影响。

回落调整阶段(图7(d)):在这个过程中,撞击速度逐渐趋于0,被抛射、熔融的物质在重力作用下一部分将回落至撞击坑周围及坑内,撞击坑在重力作用下也不断调整稳定,在撞击坑周围形成环形的“山丘”;而被抛射至高空的细小粉尘将随着大气以悬浮方式运动至远方。

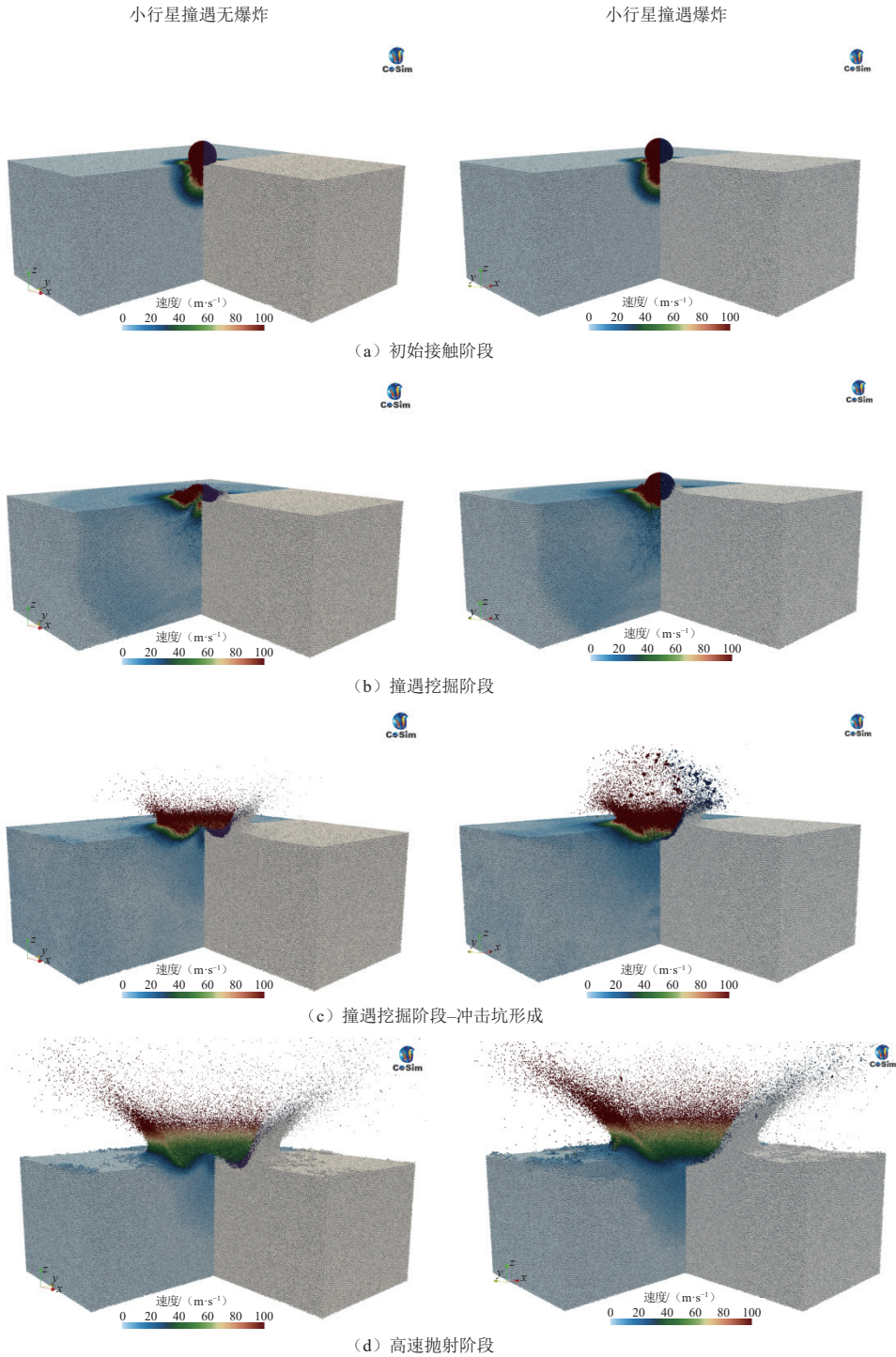


图 6 小行星垂直入射形成冲击坑过程模拟结果 (图中左半侧为速度运动图, 右半侧为小行星和陆地岩石的物质分区)

Fig. 6 Numerical results of impact crater forming process by the asteroid with perpendicular incidence

3.2 小行星倾斜入射

为分析小行星撞遇陆地时的入射角度对撞击坑形成动力过程的影响, 本节对 45° 撞遇入射角的情况进行了分析, 撞遇速度及其它计算参数与垂直入射时一致。数值计算得到的撞击坑形成的动力学过程如图8所示, 可以看出撞遇动力学过程与垂直入射时相似, 也

分为初始接触、撞遇挖掘、高速抛射和回落调整4个阶段; 但是受倾斜入射的影响, 所产生的冲击波沿着撞遇入射方向更为强烈, 而反方向则相对较弱; 受水平方向撞遇速度的影响, 沿着撞遇入射的水平方向上形成的撞击坑范围较大, 因此最终形成的撞击坑在平面上呈现椭圆形; 与此同时, 由于垂直方向的撞遇速度

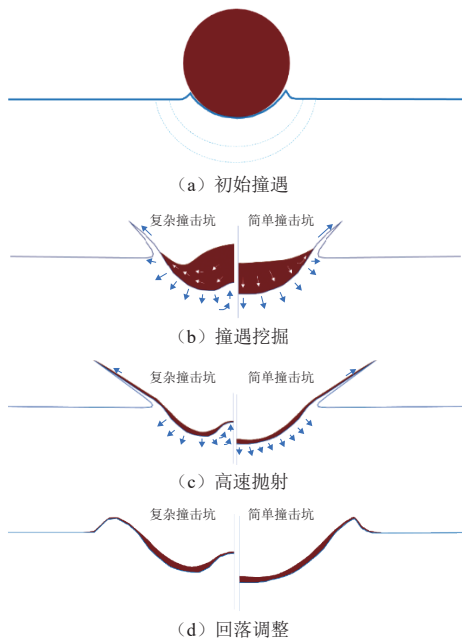


图 7 小行星撞遇陆地成坑动力过程

Fig. 7 Dynamic process of asteroid impacting the land

分量较小, 所以相同的撞击能量情况下, 倾斜入射所形成的撞击坑深度较垂直入射小。

撞遇过程中小行星及陆地岩石物质抛射及分布情况如图9所示。对比垂直入射工况(图6)受撞遇速度方向的影响, 沿着水平撞遇速度方向抛射物质远大于其它方向, 同时在撞击坑深度及坑内小行星物质分布也呈现不对称性分布, 呈“勺状”; 且在初始入射点侧形成的撞击坑“山丘”高度低, 而沿着水平入射方向、远离初始入射点侧撞击坑“山丘”则相对较高。与之相应的, 撞击坑底部岩石的熔融、高温及动力变质作用也会呈现一定的差异。据此通过现存撞击坑底部岩石构造特征在一定程度上可反演推测撞遇成坑时小行星的入射方向。

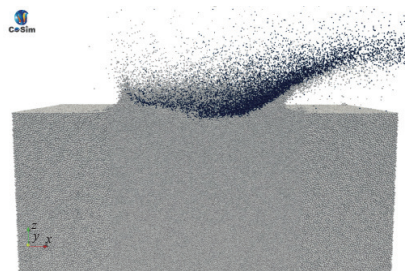


图 9 小行星以45°入射角撞遇陆地形成撞击坑及抛射物质分布
Fig. 9 Impact crater and projected material distribution formed by the asteroid with the incidence of 45°

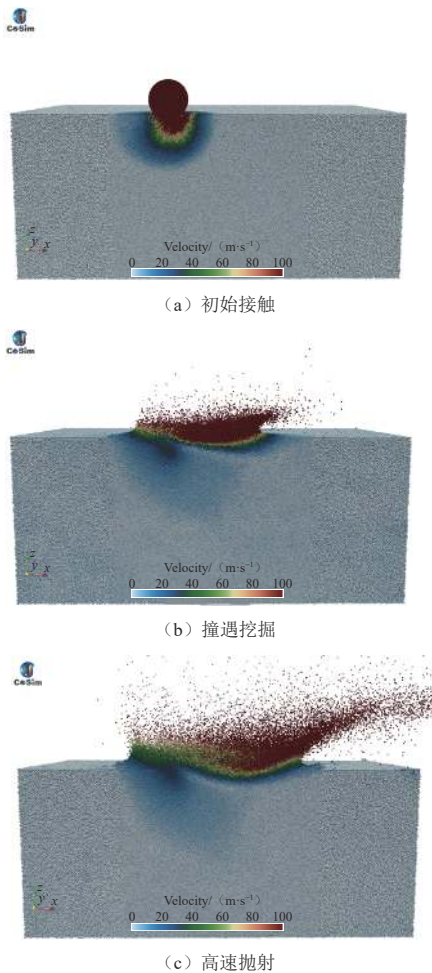


图 8 小行星以45°入射角撞遇陆地形成撞击过程模拟结果

Fig. 8 Numerical results of impact crater forming process by the asteroid with the incidence of 45°

4 结 论

小行星撞遇陆地是一个复杂的动力学过程。由于撞遇属于超高速问题、并伴随着复杂的空气动力学、热力学、化学、力学等过程, 难以通过模型试验开展相关的研究, 也导致目前的研究成果较少。本文采用自主研发的高性能计算软件CoSim, 开展了小行星撞遇陆地动力学过程的大规模仿真分析。

通过对小行星垂直入射撞遇(爆炸和不爆炸)、倾斜入射撞遇陆地成坑全过程分析, 论证了撞遇陆地4个阶段, 即初始接触、撞遇挖掘、高速抛射和回落调整。尤其在初始接触阶段, 将在陆地形成巨大的冲击地震波, 产生冲击振动效应。

小行星的撞遇入射角度将影响撞击坑及周围环形“山丘”的地貌特征, 近似垂直入射形成的撞击坑在水平方向上呈近似于圆形的“锅状”, 而倾斜入射形成的撞击坑则近似为椭圆形的“勺状”。同时, 撞遇过程中是否发生爆炸所形成的撞击坑也有差异, 对于未发生爆炸的小行星形成中间凸起四周凹陷的“复杂撞击坑”, 而发生爆炸的小行星则形成锅状的“简单撞击坑”。

高性能数值方法为小行星撞遇地表灾害动力学研究提供了解决思路,但本文的分析只是初步的,为更好地考虑超高速撞遇过程中的空气动力学效应、热力学、岩石相变过程以及大尺度范围下对地壳岩石圈运动的影响等还需要深入发展相关算法,从而为防灾减灾提供更加可靠的理论及技术支撑。

参 考 文 献

- [1] OSINSKI G R, GRIEVE R A F, FERRIERE L, et al. Impact Earth: a review of the terrestrial impact record[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 232: 104112.
- [2] BUILDREPS M. The younger dryas impact hypothesis[EB/OL]. [2023-05-06]. <https://www.mariobuildreps.com/younger-dryas-impact-hypothesis/>.
- [3] VON FRESE R R B, POTTS L V, WELLS S B, et al. GRACE gravity evidence for an impact basin in Wilkes Land, Antarctica[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(2): 02014.
- [4] 陈鸣. 岫岩陨石坑: 撞击起源的证据[J]. *科学通报*, 2007, 52: 2777-2780.
CHEN M. Xiuyan impact crater: evidence of the impact origin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52: 2777-2780.
- [5] 陈鸣, 谢先德, 肖万生, 等. 依兰陨石坑: 中国东北部一个新发现的撞击构造[J]. *科学通报*, 2020, 65(10): 948-954.
CHEN M, XIE X D, XIAO W S, et al. Yilan impact crater: a newly discovered impact crater in northeastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(10): 948-954.
- [6] MAZROUEI S, GHENTR R, BOTTKIEW F, et al. Earth and Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic[J]. *Science*, 2019, 363(6424): 253-257.
- [7] ARTEMIEVA N A, SHUVALOV V V. From Tunguska to Chelyabinsk via Jupiter[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44(1): 37-56.
- [8] 刘芹芹, 申旭辉, 周炳红, 等. 近地小行星撞遇地球灾害链效应[J]. 空间碎片研究, 2022, 22(1): 1-17.
LIU Q Q, SHEN X H, ZHOU B H, et al. Disaster chain effects from near-Earth asteroids collision with Earth surface[J]. *Space Debris Research*, 2022, 22(1): 1-17.
- [9] EZZEDINE S M, LOMOV I, MILLER P L, et al. Simulation of asteroid impact on ocean surfaces, subsequent wave generation and the effect on US shorelines[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 103: 113-120.
- [10] NEILL C O, MARCHI S, ZHANG S, et al. Impact-driven subduction on the Hadean Earth[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 793-797.
- [11] COLLINS G S, PATEL N, DAVISON T M, et al. A steeply-inclined trajectory for the Chicxulub impact[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1480.
- [12] YANG D X. Numerical modeling of laboratory-scale asteroid impact based on elastoplastic flow model and CESE method[J]. *AIP Advances*, 2021, 11: 125024.
- [13] 黄川, 傅容珊. 小行星撞击对地球的上地幔对流的影响[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1534-1542.
HUANG C, FU R S. Perturbations of Earth's upper mantle convection caused by asteroid impacts[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 1534-1542.
- [14] CUNDALL P A, STRACK O D. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47-65.
- [15] ZHOU Q, XU W, LIU G. A contact detection algorithm for triangle boundary in GPU-based DEM and its application in a large-scale landslide[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 138: 104371.
- [16] LIU G, XU W, GOVENDER N, et al. A cohesive fracture model for discrete element method based on polyhedral blocks[J]. *Powder Technology*, 2020, 359: 190-204.
- [17] POPOVA O, BOROVÍČKA J, HARTMANN W K, et al. Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, 46(10): 1525-1550.

作者简介:

徐文杰(1980-),男,副教授,主要研究方向:工程地质力学及高性能计算方法、地质灾害防治理论与技术。

通信地址:北京市海淀区清华大学水利水电工程系 岩土工程研究所 (100084)

E-mail: wenjiexu@tsinghua.edu.cn

申旭辉(1965-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:空间地球物理与遥感地学应用研究。**本文通信作者**。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条一号(1000190)

E-mail: shexuhui@nssc.ac.cn

Computational Simulation of the Dynamics of Craters Formed by Asteroid Collisions with Land

XU Wenjie¹, LIU Qinqin^{2,3}, SHEN Xuhui^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The process of an asteroid impacting the land is a complex non-linear dynamic process, which is difficult to study by using model tests. Numerical simulation provides an important tool for the analysis of this process. In this study, the large-scale numerical simulation of the dynamic process of the asteroid impacting land was realized initially by using the self-developed software CoSim-DEM based on the discrete element method (DEM). Based on the numerical simulation results, the four stages of the impact process—initial contact, impact excavation, high-speed ejection and adjustment—were simulated; the incidence angle and the dynamic behaviors of the asteroid during the impact process would affect the topographic characteristics of the crater. This study also indicates that large-scale numerical methods can be used to perform the analysis of dynamic process of the asteroid impacting the earth, and provide support for asteroid defense.

Keywords: asteroid; impact crater; discrete element method (DEM); numerical simulation

Highlights:

- The CoSim-DEM has been developed based on DEM and the parallel accelerated of GPU.
- CoSim-DEM was used to perform the simulation of the whole dynamic process of the asteroid impact land.
- The asteroid impact processes with land under three cases are performed, and four stages of the impact process were established. Two kinds of crater formation processes of “complex impact crater” and “simple impact crater” are proposed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]