

doi:10.13745/j.esf.2014.06.020

# 撞击坑数值模拟中状态方程替代原则及误差分析

岳宗玉<sup>1</sup>, 邸凯昌<sup>1</sup>, 刘召芹<sup>1,\*</sup>, 胡文敏<sup>2</sup>, 苟盛<sup>1</sup>

1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101
2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008

YUE Zongyu<sup>1</sup>, DI Kaichang<sup>1</sup>, LIU Zhaoqin<sup>1,\*</sup>, HU Wenmin<sup>2</sup>, GOU Sheng<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

YUE Zongyu, DI Kaichang, LIU Zhaoqin, et al. The principle of substitution of equation of state and error analysis for crater simulation. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 204-211

**Abstract:** Impact cratering is an important surface process on most of the terrestrial planets in solar system. In this paper we described the impact crater formation mechanism, and then introduced the method of numerical simulation for crater study. We first expounded the basic theories and strategies of impact cratering simulation, during which we stressed that Equation of State (EoS) played an important role in the numerical simulation. However, compared to the varieties in the real world, only a few materials' EoS is available and the substitution is inevitable in craters' numerical simulation. We elaborated the concept and principle of substituting the EoS with that of another material that their Hugoniot curves should be similar, and we further analyzed the deviation of different physical quantities and ejection velocities from the substitution theoretically. Finally, we carried out numerical simulations to two small craters with targets of granite and quartzite, respectively, and the similarities with the deviations in peak pressure, temperature and densities are directly shown through the results. We think this kind of analyses could support future study in the field of planetary science, especially under the background that much more data would be transmitted from lunar, Mars, and other celestial bodies.

**Key words:** hugoniot curve; EoS; impact crater; numerical simulation

**摘要:** 撞击坑是太阳系内大多数类地行星表面的一种重要地质过程, 文中介绍了撞击坑形成的机制和撞击坑研究中的数值模拟方法。首先介绍模拟撞击成坑过程的基本理论与策略, 着重指出状态方程在数值模拟中具有重要作用。然而, 相对于客观世界物质复杂多样, 在撞击坑数值模拟中仅有少数物质的状态方程, 因此在研究中不可避免地使用其他物质的状态方程进行替换。详细阐述了状态方程替换的概念和原则, 即它们的雨贡纽曲线必须相似。其次进一步从理论上分析这种替代过程对物理属性以及溅射速度的影响。最后, 开展两个小型撞击坑的数值模拟, 靶区分别使用花岗岩和石英岩, 模拟结果显示了两次模拟中的峰值压力、温度以及密度的相似性和差异性。这种分析能够有助于行星科学领域的研究, 尤其是在目前从月球、火星以及其他星体正在获取越来越多数据的阶段。

**关键词:** 雨贡纽曲线; 状态方程; 撞击坑; 数值模拟

中图分类号: P184.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2014)06-0204-08

收稿日期: 2014-07-11; 修回日期: 2014-08-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2013CB733201)

作者简介: 岳宗玉(1980-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事撞击坑数值模拟相关研究。E-mail: yuezy@radi.ac.cn

\* 通讯作者简介: 刘召芹, 男, 副研究员。E-mail: liuzq@radi.ac.cn

撞击坑是月球与类地行星表面的一种常见地质现象, 它与其他地质现象也有密切的关系, 是研究行星地质学的一把钥匙, 在行星地质学研究中具有突出的地位<sup>[1]</sup>。在撞击坑的早期研究中, 影像解译是一种主要的手段, 这种方法能为撞击坑的形态特征提供重要信息<sup>[2-3]</sup>, 直到目前仍发挥着重要作用, 但很难对撞击坑的形成机制做深入分析; 撞击坑研究的另一种途径是进行物理实验, 这种方式能够真实再现撞击坑的形成过程, 但是开展实验需要较高的经济成本, 而且有些撞击坑的发生条件很难人工实现; 20 世纪 60 年代在撞击坑研究领域出现了一种新的研究方法, 这就是利用计算机对撞击坑的形成过程进行数值模拟<sup>[4]</sup>, 这种方法能够以较低的成本在广泛的物理条件下深入地分析撞击坑的形成机制, 随着计算机科学的发展变得逐渐成熟与完善。

对撞击坑形成过程进行数值模拟的基本原理是将物理空间栅格化表示, 在给定初始条件(包括撞击速度、靶区与陨击体的物质成分及状态等)的情况下用计算机代码自动实现撞击的整个过程<sup>[5]</sup>, 并根据影像解译的结果对撞击坑最终的形态相比较, 验证数值模拟的可靠性, 从而分析陨击体和靶区物质的物理状态及其发展过程, 并揭示其他潜在的规律。在数值模拟中撞击过程的运行需要遵守相应的物理规律, 其中牛顿运动定律与物质的状态方程 (equation of state, EoS) 是撞击坑数值模拟的两大理论支柱<sup>[6]</sup>。前者与物质类型无关, 而后者则决定于物质成分, 且数值模拟中所得到的热力学参数全是通过状态方程计算出, 并将这些参数反馈给前者, 因而状态方程在数值模拟中具有重要作用。

状态方程是描述物质的热力学参数关系的基本函数; 在众多的热力学参数中, 任意 3 个参数 (例如压强  $p$ , 温度  $T$ , 体积  $V$ ) 均可确定这种关系。在物理学中, 对状态方程的研究往往仅涉及纯净物质; 在地球物理学与岩石学中, 对状态方程的研究经常局限于固态或液态; 然而在撞击坑数值模拟过程中, 所涉及的自然界中的物质成分复杂多样, 同时这种高速撞击经常伴随着物质的气化, 所需要的状态方程不仅能满足混合物的需要, 而且也可用于极端条件下。在撞击坑模拟程序 iSALE (Impact-Simplified Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 中<sup>[7-8]</sup>, 所用到的状态方程包括 Tillston 与 ANEOS 两种类型, 共 16 种单质与混合物, 显然这远远不能满足实际需要。然而得到一种物质的状态方程代价较高, 在模拟其

类地行星或卫星的撞击坑时几乎没有可用的样品, 因此在实际数值模拟中经常用其他物质的状态方程替代类似的物质。例如, 在大规模的撞击坑数值模拟中, 月壳的物质状态常用花岗岩状态方程来表示, 月幔常用橄榄岩的状态方程近似表示<sup>[9-10]</sup>, 因此人们常怀疑模拟结果的可靠性。本文目的正是通过深入分析撞击坑形成机制, 解释状态方程替代的原则, 分析产生的偏差, 最后通过数值模拟展示具有相似雨贡纽 (Hugoniot) 曲线的两种 EoS 产生的撞击坑性质的异同。

## 1 撞击坑形成机制与雨贡纽曲线

### 1.1 撞击坑形成机制

撞击坑的形成过程可以分为 3 个阶段: 压缩、挖掘与改造<sup>[11]</sup>。压缩阶段以高速运行的陨击体与靶区接触时开始, 强烈的压缩使接触点形成冲击波, 在随后极短时间内以撞击点为中心扩散。在扩散的过程中由于能量密度的降低以及能量损耗, 冲击波的强度迅速减弱, 之后衰减成应力波在靶区中传播。初始形成的冲击波呈半球形, 大小与陨击体直径相当。冲击波在向靶区扩散的同时也向陨击体迅速传播。在压缩阶段强大的冲击波产生高压, 它使靶区与陨击体强烈变形、碎裂, 并且使其物质开始运动; 一旦产生的高压超过压缩物质的弹性极限, 则使其产生塑形变形, 所产生的高温使物质熔融、相变、气化, 陨击体很大一部分的初始动能转化为撞击区的内能。另外, 冲击波高压强烈压缩靶区与陨击体物质中的孔隙, 是一个不可逆的过程<sup>[12]</sup>。需要注意的是压缩阶段产生的冲击波并没有对撞击坑形态造成较大的影响, 因为冲击波传播的速度相当快, 随着距离衰减增大, 使靶区物质产生的最大位移在撞击点, 但陨击体的直径是这种位移的极限<sup>[11]</sup>。当冲击波传播至陨击体尾部时发生反射, 使陨击体尾端获得了约相当于 2 倍撞击速度的瞬时速度<sup>[13]</sup>, 导致尾部急剧膨胀, 形成稀疏波, 并且向陨击体的前端以高于冲击波的速度传播, 使陨击体从高压中迅速卸载, 当陨击体完全卸载时压缩阶段结束。

在压缩阶段, 陨击体与靶区由于强烈的撞击而成为连续体, 使得稀疏波得以穿过撞击界面向靶区深处传播 (如果靶区与陨击体物质性质不同, 则在稀疏波到达二者界面时将发生稀疏波的反射与透射), 之后稀疏波将穿过界面卸载被压缩的靶区物质。这

个稀疏波使靶区物质获得了与压缩阶段得到的方向相反的速度, 由于压缩阶段是一个不可逆过程, 这两个速度的矢量和(以下称为溅射速度)与压缩阶段速度方向一致, 以撞击点为中心向周围辐射, 因此撞击点正下方的物质仍旧向下运动, 不会被溅射出来<sup>[14]</sup>。但撞击点周围的区域则获取了向四周辐射的溅射速度, 它使靶区物质向外溅射, 形成溅射幕, 使撞击坑的形成进入挖掘阶段, 抛射出大量靶区物质, 形成瞬时撞击坑。当溅射速度消失时挖掘阶段结束, 其持续时间可达数分钟, 它与靶区物质的性质关系较大。

在改造阶段由撞击与挖掘产生的松散物质向撞击坑内部滑塌, 使撞击坑变浅; 复杂撞击坑(此类撞击坑的直径在月表大约为 14 km 以上)的坍塌过程尤为壮观, 其较低的深度/直径比值需要用声波液化模型解释<sup>[15-17]</sup>; 尽管它对撞击坑后期形态改造作用较大, 但不是本文研究的重点。

可以看出瞬时撞击坑的形成过程主要取决于溅射速度及其时间、空间的分布, 而溅射速度取决于冲击波产生的压强梯度与随后产生的稀疏波的强度。由于撞击过程中形成的冲击波强度(>数十 GPa)远大于靶区岩石的强度(一般 < 2 GPa<sup>[18]</sup>), 因而靶区物质强度对撞击坑的形成影响很小(但在分析撞击引起的撞击坑周围物质变形时需要考虑靶区岩石的强度), 所以压缩阶段对撞击坑后期的发展具有重要的影响, 这是一个冲击波产生、传播的过程, 而靶区物质获取的高压可以通过雨贡纽曲线解算<sup>[19]</sup>。

1.2 冲击波波阵面前后关系式

在撞击坑形成阶段的冲击压缩中, 根据冲击波波阵面质量、动量和能量的守恒关系, 可以将波阵面两侧的压强、密度(或比值体积)、内能、粒子速度与冲击波速度联系起来, 这就是雨贡纽关系式<sup>[11]</sup>:

$$E - E_0 = (p + p_0)(V_0 - V)/2 \quad (1)$$

其中  $p_0, E_0, V_0$  与  $p, E, V$  分别表示物质经受冲击波压缩前(即初始状态)与压缩后的压强、比值内能与比值体积。撞击过程中初始状态视为已知的, 雨贡纽关系式与物质的状态方程联合构成一条曲线, 即雨贡纽曲线。假设物质的状态方程可用如下方程表示:

$$f(V, E) = p \quad (2)$$

如果状态方程有简单表达式, 那么可以联合以上两式得到雨贡纽曲线的解析解, 但一般情况下状态方程较为复杂, 只能得到雨贡纽曲线的数值解。

另外可以看出雨贡纽曲线与物质的初始状态也有密切关系。

根据波阵面前后的质量、能量、动量关系式还可以得到冲击波的传播速度与粒子速度<sup>[11]</sup>:

$$U = V_0 \sqrt{(p - p_0)(V - V_0)} \quad (3)$$

$$u_p = \sqrt{(p - p_0)(V - V_0)} \quad (4)$$

其中  $U$  表示冲击波传播速度,  $u_p$  表示粒子速度。

1.3 撞击坑形成过程中物质的状态变化曲线

图 1 中曲线 H 表示撞击靶区的雨贡纽曲线, 其初始状态为  $A(p_0, V_0)$ , 当陨击体撞击靶区时, 靶区物质状态将突跃至  $B$  点(并不是沿曲线 H), 当稀疏波经过后, 受压缩的物质迅速卸载, 其状态将从  $B$  点沿着等熵线移到  $C$  点, 由于卸载后的压强相等, 但温度比初始温度高, 故  $C$  点位于  $A$  点右侧。这两条曲线决定了撞击坑形成过程中靶区物质的状态变化过程, 它们不仅形态非常相似, 而且位置相近, 在冲击波较弱时(接近声波), 两条曲线就完全重合了, 也就是说, 等熵线是雨贡纽曲线的极限值, 如果两种物质在相同初始条件下的雨贡纽曲线相似, 则它们冲击卸载的状态变化曲线也相近。

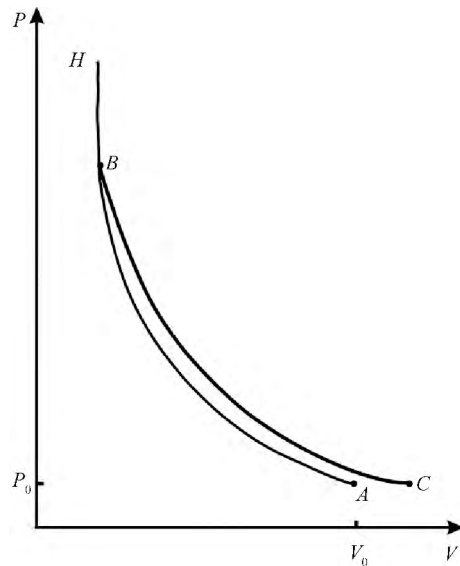


图 1 撞击过程与雨贡纽曲线

Fig. 1 The impact process and the Hugoniot curve  
A 表示物质的初始状态; B 表示冲击波到达后的状态; C 表示稀疏波卸载后的状态。

2 EoS 替代引起的误差分析

2.1 理论分析

如前所述, 雨贡纽曲线能够确定撞击坑形成过

程中压缩阶段靶区物质的热力学状态,而且如果两种物质在相同初始条件下的雨贡纽曲线相似,那么在相同的撞击条件下,靶区物质冲击与卸载的状态变化曲线也相似,因而在缺少所需状态方程的情况下,可利用这一原则进行状态方程的替换,但在实际运用中必须了解这一原理并能评估可能带来的误差,为此这里首先对物质的状态参数误差进行理论分析。

雨贡纽曲线及粒子速度与冲击波速度公式共涉及 5 个变量,现在假设撞击速度已知,利用上面的方程(1)~(4)即可以求出剩余 4 个未知数( $p, E, V, U$ ),因而能够求得解析解或者在状态方程复杂的情况下求其数值解。也就是说,方程中所涉及的  $p, E, V, U$  在两种物质的雨贡纽曲线相同的情况下,所得到的压强、比值内能、比值体积、冲击波波速是相同的。但要注意的是,即使两种物质的雨贡纽曲线完全相同,在初始条件相同的条件下所得到的其他物理量的终态也是不同的,其大小与物质的其他性质有关。

但在两种物质的雨贡纽曲线出现偏差的情况下,即使撞击条件相同(即  $u_p$  相同),雨贡纽曲线所涉及的  $p, E, V, U$  也不相同,它们之间的差异可以通过实际测量得到。表 1 为实际测量得到的石英岩与花岗岩在不同撞击条件下的物理状态参数<sup>[20]</sup>,其中花岗岩的主要成分质量分数为  $\text{SiO}_2$  80%,  $\text{K}_2\text{O}$  7%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  6% 以及微量的  $\text{Na}_2\text{O}$  及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等,而石英岩的主要成分为  $\text{SiO}_2$ 。

图 2 所示是花岗岩与石英岩的冲击波压强与比值体积之间的关系曲线,在撞击实验中的初始状态约为  $p_0=0$  Pa,  $V_0=0.38$   $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。通过对比值体积采用  $0.005$   $\text{cm}^3/\text{g}$  的间隔对两条曲线进行分段线性插值,得到两条曲线压强的平均差为  $0.49$  GPa,中误差为  $3.90$  GPa,可见两条曲线在该范围内非常相似。

表 1 石英岩与花岗岩在不同撞击条件下的物理状态参数

Table 1 Measured values of the physical variables of quartzite and granite under different shock conditions

岩石	撞击速度 / $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	冲击波速度 / $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	比值体积 / $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	压强 / GPa	内能变化量 / $(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
花岗岩	0.00	0.00	0.38	0	0
	0.74	5.4	0.33	10.39	0.27
	1.71	5.53	0.27	24.59	1.46
	2.33	5.8	0.23	35.14	2.71
	2.6	6.26	0.22	42.32	3.38
	3.05	6.99	0.22	55.43	4.65
	3.22	7.42	0.22	62.12	5.18
	3.66	7.99	0.21	76.03	6.7
石英岩	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00
	0.79	5.67	0.33	11.87	0.31
	1.25	5.7	0.29	18.88	0.78
	1.68	5.72	0.27	25.47	1.41
	2.05	5.75	0.24	31.24	2.10
	2.52	6.27	0.23	41.87	3.18
	2.77	6.43	0.21	47.2	3.84
	3.13	7.18	0.21	59.55	4.90

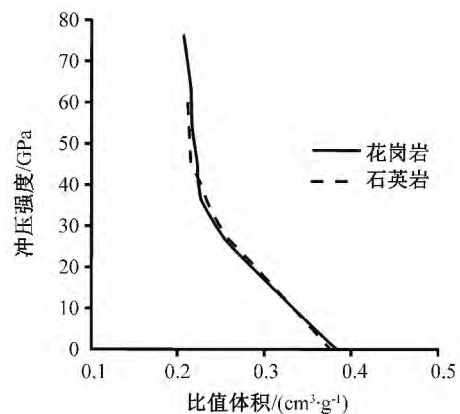


图 2 花岗岩与石英岩的雨贡纽曲线 (数据来自文献<sup>[20]</sup>)

Fig. 2 Hugoniot curves of granite and quartzite

表 2 不同冲击条件下花岗岩与石英岩的物理参数及其差异

Table 2 The values and the deviation fraction of the physical parameters of granite and quartzite

冲击速度 / $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	冲击波速度 / $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$			比值体积 / $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$			冲击压强 / GPa			比值内能增量 / $(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$		
	花岗岩	石英岩	偏差 / %	花岗岩	石英岩	偏差 / %	花岗岩	石英岩	偏差 / %	花岗岩	石英岩	偏差 / %
0.74	5.4	5.67	5.00	0.33	0.33	0.00	10.39	11.11	6.93	0.27	0.26	3.70
1.71	5.53	5.72	3.44	0.27	0.26	0.04	24.59	25.93	5.45	1.46	1.47	0.68
2.33	5.8	6.06	4.48	0.23	0.23	0.00	35.14	37.57	6.92	2.71	2.74	1.11
2.6	6.26	6.32	0.96	0.22	0.22	0.00	42.32	43.58	2.98	3.38	3.40	0.59
3.05	6.99	7.01	0.29	0.22	0.21	0.05	55.43	56.81	2.49	4.65	4.66	0.22
3.22	7.42	7.37	0.67	0.22	0.21	0.05	62.12	62.94	0.84	5.18	5.17	0.19
3.66	7.99	8.28	3.63	0.21	0.21	0.00	76.03	77.73	2.26	6.7	6.46	3.58

表 2 列出了相同冲击条件下花岗岩与石英岩的冲击波速度、比值体积、冲击压强、比值内能变化量以及各物理量偏差的百分比, 其中石英岩的状态参数通过最小二乘法插值得到, 从中可以看出两种物质在相同冲击条件下引起的物理状态参数的偏差很小(最大偏差出现在冲击波速度方面, 为 5%)。

## 2.2 撞击过程的复杂性

前面对撞击坑的形成机制以及由状态方程的替代产生的误差进行了定量分析, 但实际的撞击过程更加复杂, 主要表现在以下几个方面: (1) 靶区物质初始状态有差异。在对撞击坑进行数值模拟时往往需要模拟的靶区深度达数十 km 甚至数百 km, 而不同深度的物质所具有的初始状态不同。靶区物质中的压力随深度增加而增大, 温度也由于热流的存在而出现差异, 因而靶区物质的初始状态可能有较大差异。但是雨贡纽曲线与初始状态有关, 因而即使靶区表面物质具有相似雨贡纽曲线, 也不能保证与靶区深处物质的雨贡纽曲线相似。(2) 靶区物质层状结构明显, 边界处将发生冲击波的反射与透射, 如果上层物质阻抗较下层小, 那么冲击波将在物质界面处反射回来, 对该层物质进行二次冲击压缩, 其雨贡纽曲线与初始状态的雨贡纽曲线有较大差异。(3) 在冲击过程中不同物质发生的相变也不相同, 而且物质中的孔隙也影响该物质的雨贡纽曲线, 这不仅增加了雨贡纽曲线的复杂性, 也使得实际物质的雨贡纽曲线差异变大并且难以定量估计。(4) 靶区中的实际物质成分复杂, 而且具有各向不均一性, 这无疑对状态方程的替代产生难以定量估计的影响。

## 2.3 数值模拟结果比较

为了比较具有相似雨贡纽曲线的物质在撞击坑数值模拟结果中的差异, 本文采用了 iSALE 程序分别对石英岩与花岗岩的靶区进行了撞击坑数值模拟。iSALE 程序是在 SALE 程序的基础上进行开发的<sup>[7-8]</sup>, 除继承原有功能之外, iSALE 又添加了弹性连续体模型<sup>[21]</sup>与 16 种物质的状态方程<sup>[22-23]</sup>, 并增加了物质的孔隙模型<sup>[8]</sup>以及热软化模型<sup>[24-25]</sup>, 用以模拟复杂的物质。在本研究所进行的数值模拟中均采用铁质陨击体, 靶区最高的空间分辨率设为 10.0 m, 所占半径为 1.5 km, 深度为 2.0 km; 扩展区以 1.05 倍最高分辨率的比值向外增加, 最大模拟半径为 33.2 km, 深度为 42.7 km。陨击体直径为 100.0 m, 陨击速度为 17.0 km/s。为精确表达物质的热力学状态, 研究中采用了半解析式的 ANEOS (Analytic EOS) 类型的状态方程<sup>[26]</sup>, 它是由复杂的计算机代码运算产生, 将物质的热力学状态划分成许多区间, 在每个区间用合适的热力学参数进行描述, 从而最大可能地贴近物质的热力学状态。表 3 列出了数值模拟中所用到的参数。

(1) 冲击压力。在撞击过程中产生的冲击压力对靶区物质的影响较大, 它不仅决定了撞击坑的形态, 而且对撞击过程产生的熔岩的质量与分布、撞击过程靶区岩石的应变大小及分布等都具有重要的影响。图 3 所示为撞击后 1 s 时撞击坑区域的冲击压力的分布, 可以看出两种物质在相同的撞击条件下产生的峰值压力大小与空间分布分布相似。

(2) 温度、密度变化的分布。图 4 显示了本研究

表 3 数值模拟中所用到的参数

Table 3 Models and parameters used in this research

模型	参数意义	花岗岩	石英岩	铁陨石
破裂模型 <sup>[23]</sup>	低压下最小破裂应变	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
	模型常数/ $\text{Pa}^{-1}$	$10^{-11}$	$10^{-11}$	$10^{-11}$
	挤压破裂发生时的最低应力/MPa	300	300	300
强度模型 <sup>[24]</sup>	完整物质内聚强度/MPa	10	10	5
	完整物质内摩擦系数	2	2	1
	完整物质高压下的极限强度/MPa	300	2 500	1 700
	破碎物质内聚强度/MPa	0.01	0.01	$10^{-5}$
	破碎物质内摩擦系数	0.6	0.6	0.4
	破碎物质高压下的强度/MPa	2 500	2 500	1 700
热软化模型 <sup>[24-25]</sup>	等容比热/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1 000	400	440
	零压下熔点/K	1 673	1 750	1 811
	Simon 参数 $a$ /MPa	6 000	6 000	6 000
	Simon 参数 $c$	3	3	3
	热软化模型参数	1.2	1.2	1.2

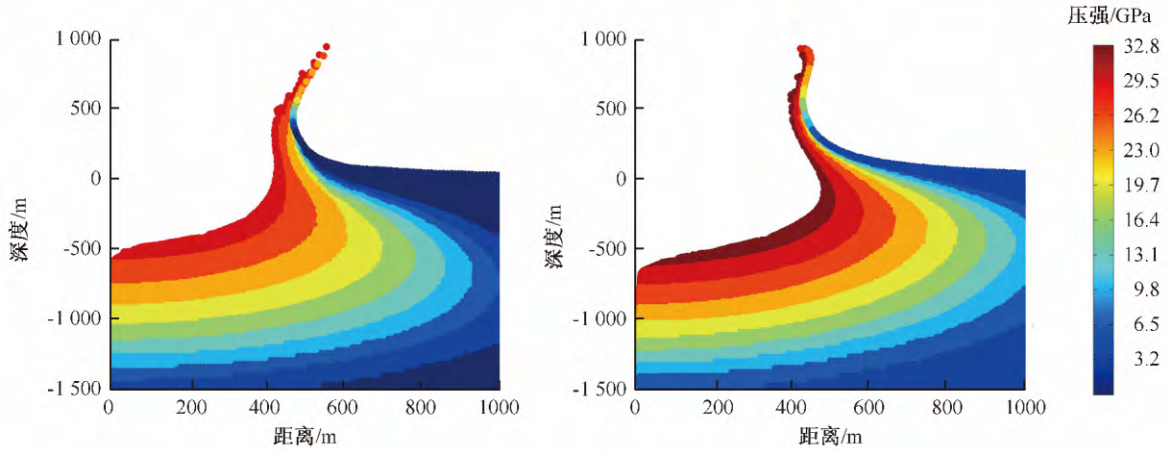


图3 根据 iSALE 得到的峰值压强的分布

Fig. 3 Peak shock pressure distribution from iSALE

左图中靶区为花岗岩,右图中靶区为石英岩。横轴、纵轴表示撞击坑的大小,单位:m。

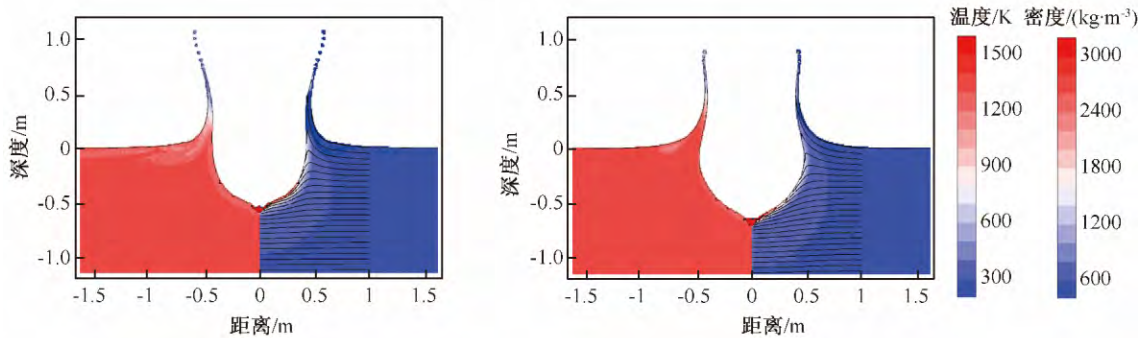


图4 根据 iSALE 得到的密度与温度的分布

Fig. 4 The distribution of density and temperature

左图中靶区为花岗岩,右图中靶区为石英岩;横轴、纵轴表示撞击坑的大小,单位:m。两图中左侧表示密度变化,右侧表示温度变化。

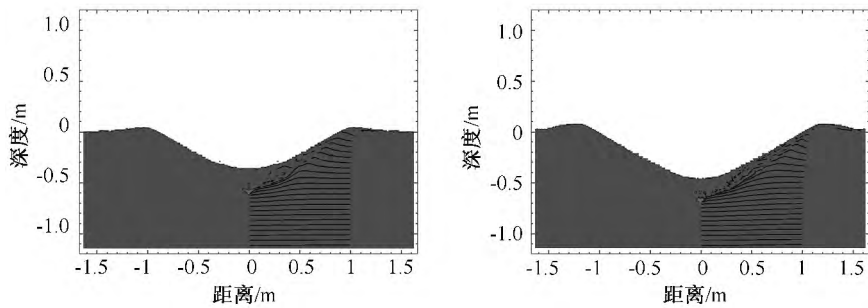


图5 根据 iSALE 得到的撞击坑的最终形态

Fig. 5 The final morphology of the impact craters from the iSALE

左图中靶区为花岗岩,右图中靶区为石英岩;横轴、纵轴表示撞击坑的大小,单位:m。右侧线段表示了追踪的物质在撞击坑形成过程中的变形。

利用数值模拟的方法得到的花岗岩与石英岩在撞击过程中引起的温度与密度变化的差异,其中左图与右图分别表示花岗岩与石英岩中的密度(左侧)、温度(右侧)变化。在花岗岩中,密度变化影响的范围

稍大,而在石英岩中密度的变化则呈环状,但它们都集中在撞击坑的边缘部位。温度变化在两种物质中表现相近,在撞击坑底部温度都要高于周围。

(3) 撞击坑的最终形态。撞击坑的形态是评判

模拟结果的重要依据。本研究中, 两种类型物质的撞击坑数值模拟进行至 50 s 时停止运行, 此后没有任何变化。图 5 表示靶区为花岗岩与石英岩的撞击坑的最终形态与规模, 形成的撞击坑的直径分别约为 1.75 km 与 1.95 km, 相差约 10%; 深度分别为 0.35 km 与 0.58 km, 相差约 39%, 且在石英岩中形成的撞击坑直径与深度均比在花岗岩中要大。撞击坑的最终深度差异比数值模拟中的其他参数差异稍大, 这可能因为它不仅与两种物质的 EoS 相关, 而且与物质的强度相关。

### 3 讨论与结论

数值模拟是撞击坑形成机制研究的一个主要手段, 能以较低的代价实现极端的条件, 而且随着对物质模型描述更加全面将具有更广阔的前景。在撞击坑数值模拟中, 物质状态方程的贫乏已经严重阻碍了撞击坑数值模拟的发展, 在替换物质的 EoS 时一条重要原则是两种物质需要具有相似的雨贡纽曲线, 其主要原因是撞击过程产生的冲击压强等参数取决于该物质的雨贡纽曲线。但撞击过程中物质的其他参数仍存在偏差, 而且这种偏差能够影响物质的其他热力学参数。另外撞击过程的复杂性也使得这种偏差可能加大, 因此在使用这一原则时要格外小心。本文在撞击坑形成机制的基础上, 首先对撞击过程由于状态方程替代引起的误差进行了理论分析, 然后以花岗岩与石英岩为例定量评价了各物理量的偏差。

非常感谢 iSALE 的开发者, 包括 Gareth Collins, Kai Wunnemann, Boris Ivanov, Jay Melosh 和 Dirk Elbeshausen 教授, 其中 Boris Ivanov 教授与 Jay Melosh 教授对本文的写作也给予了帮助; 中国地质大学(武汉)肖智勇博士与曾佐勋教授也对本文的写作提出了良好的建议。

### 参考文献

- [1] 岳宗玉, 邱凯昌, 张平. 撞击坑形成过程数值模拟理论与方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 110-117.
- [2] Wan C, Cheng W M, Zhou Z P, et al. Automatic extraction of lunar impact craters from Chang'E-1 satellite photographs[J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(1): 162-169.
- [3] Yue Z Y, Liu J Z, Wu G G. Automated detection of lunar craters based on object-oriented approach[J]. Chinese Science

- Bulletin, 2008, 53(23): 3699-3704.
- [4] Bjork R J. Analysis of the formation of Meteor Crater, Arizona: A preliminary report[J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(10): 3379-3387.
- [5] Anderson C E Jr. An overview of the theory of hydrocodes[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 5: 33-59.
- [6] Melosh H J. A hydrocode equation of state for SiO<sub>2</sub>[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2007, 42(12): 2079-2098.
- [7] Amsden A, Ruppel H, Hirt C. SALE: A Simplified ALE Computer Program for Fluid Flow at All Speeds[R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1980.
- [8] Wünnemann K, Collins G, Melosh H J. A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets[J]. Icarus, 2006, 180(2): 514-527.
- [9] Melosh H J, Andrew M F, Johnson B C, et al. The origin of lunar mascon basins[J]. Science, 2013, 340: 1552-1555.
- [10] Yue Z Y, Johnson B C, Minton D A, et al. Projectile remnants in central peaks of lunar impact craters[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(6): 435-437.
- [11] Melosh H J. Impact Cratering: A Geologic Process[M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [12] John D, Anderson C E Jr. Modern Compressible Flow with Historical Perspective[M]. 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- [13] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [14] Melosh H J. Impact cratering mechanics: Relationship between the shock wave and excavation flow[J]. Icarus, 1985, 62(2): 339-343.
- [15] Melosh H J. Acoustic fluidization: A new geologic process[J]? Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B13): 7513-7520.
- [16] Melosh H J. A schematic model of crater modification by gravity[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1982, 82(B1): 158-165.
- [17] Melosh H J. Dynamical weakening of faults by acoustic fluidization[J]. Nature, 1996, 379: 601-606.
- [18] Melosh H J. Planetary Surface Process[M]. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [19] Zel'dovich Y B, Raizer Y P. Physics of Shock Waves and High-temperature Hydrodynamic Phenomena[M]. New York: Dover Publications Inc., 2002.
- [20] Trunin R F, Gudarenko L F, Zhernokletov M V et al. Experimental Data on Shock Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter[R]. Sarov: Russian Federal Nuclear Center-VNIIEF, 2001.
- [21] Ivanov B A, Deniem D, Neukum G. Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering[J]. International

- Journal of Impact Engineering, 1997, 20: 411-430.
- [22] Melosh H J, Ryan E V, Asphaug E. Dynamic fragmentation in impacts: Hydrocode simulation of laboratory impacts[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97 (E9): 14735-14759.
- [23] Collins G S, Melosh H J, Ivanov B A. Modeling damage and deformation in impact simulations[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2004, 39(2): 217-231.
- [24] Wünnemann K, Collins G S, Osinski G R. Numerical modeling of impact melt production in porous rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 269(3/4): 530-539.
- [25] Ohnaka M. A shear failure strength law of rock in the brittle plastic transition regime[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(1): 25-28.
- [26] Thompson S L, Lauson H S. Improvements in the Chart D Radiation-Hydrodynamic CODE III: Revised Analytic Equations of State, SC-RR-71 0714[R]. New Mexico: Sandia Laboratories Albuquerque, 1972.

### 2012 年地球科学综合类期刊主要指标

CODE	刊名	核心总被引频次			核心影响因子			综合评价总分		学科扩散指标	学科影响指标
		数值	排名	离均差率	数值	排名	离均差率	数值	排名		
I220	FRONTIERS OF EARTH SCIENCE	33	10	-0.98	0.119	10	-0.86	14.7	10	2.30	0.50
E024	地球化学	1678	6	-0.06	1.035	3	0.19	63.7	4	20.70	1.00
E142	地球科学	2057	4	0.16	0.947	5	0.09	61.8	5	28.30	1.00
E115	地球科学进展	2807	3	0.58	0.927	6	0.07	75.7	3	43.70	0.90
E300	地球学报	1589	7	-0.11	1.600	1	0.84	57.6	6	22.80	0.90
E549	地球与环境	644	8	-0.64	0.500	8	-0.43	37.1	9	20.70	0.90
E357	地学前缘	3155	2	0.78	1.014	4	0.17	76.6	2	30.00	1.00
E116	吉林大学学报地球科学版	1724	5	-0.03	0.795	7	-0.09	41.6	8	26.90	0.90
E504	矿物岩石地球化学通报	616	9	-0.65	0.492	9	-0.43	44.5	7	16.80	0.90
A108	中国科学 地球科学	3471	1	0.95	1.274	2	0.46	93.2	1	34.60	0.90
10 种期刊平均值		1777			0.870						

转引自中国科学技术信息研究所《2013 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》