

月壤孔隙内水冰奥斯特瓦尔德熟化理论

周孙鹏¹, 徐克^{1,2}

(1. 北京大学工学院能源与资源工程系, 北京 100871;

2. 北京大学地外样品研究中心, 北京 100871)

摘要: 目前, 大量证据表明月球两极的永久阴影区内可能存在与月壤混杂且储量可观的水冰资源。阐明含水月壤的力学、热学性质是理解月球水冰演化机制和开发策略的前提, 而这些关键性质与水冰在月壤多孔介质中的赋存形态息息相关。具体而言, 水冰在月壤孔隙中是以分散、高比表面积的小颗粒(霜)形式存在, 还是完成了熟化(粗化), 以与月壤颗粒尺寸相当的低比表面积大晶体形式存在? 目前既无直接观测数据, 也缺乏相关理论研究。这一认知空白也制约了对含水月壤模拟物的合理制备。推导了稀薄环境下的奥斯特瓦尔德熟化模型, 表明月壤孔隙内水冰小颗粒群(霜)在地质时间尺度下会通过物质迁移在本地孔隙内聚集粗化形成大晶体, 并定量研究了不同温度条件下水冰颗粒群的熟化速率。理论分析显示: 在月球永久阴影区中深低温区域(<100 K)表面, 水冰能够长期保持其初始沉积形态; 而在温度较高的非永久阴影区或者地下区域(>120 K), 水冰颗粒群将显著熟化, 形成与月壤粒径相当的大尺寸晶体。基于此结果, 可以通过调节温度和熟化时间, 制备与目标含水月壤的水冰粒径相同的月壤模拟物。不仅深化了对月球水冰演化机制的理论认识, 还为含水月壤相关物理性能研究和模拟物制备提供了理论参考, 对月球水冰资源开发利用具有应用价值。

关键词: 月球水冰; 奥斯特瓦尔德熟化; 含水月壤模拟物

中图分类号: P184 **文献标识码:** A **文章编号:** 2097-4302(2025)03-0011-08

DOI: 10.19963/j.cnki.2097-4302.2025.03.002

Ostwald Ripening of Water-Ice Particles in Lunar Regolith Pore Space

ZHOU Sunpeng¹, XU Ke^{1,2}

(1. Department of Energy and Resources Engineering, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Research Institute of Extraterrestrial Material, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Substantial evidence indicates that the Permanently Shadowed Regions (PSRs) at the lunar poles may harbor considerable water-ice resources mixed with lunar regolith. Understanding the mechanical and thermal properties of icy regolith is a prerequisite for elucidating the evolutionary mechanisms and exploitation strategies of lunar water-ice, and these key properties are closely related to the occurrence forms of water-ice within the porous regolith medium. Specifically, does water-ice exist as dispersed small particles (frost) within the regolith pores, or has it undergone ripening and coarsening, forming large crystals comparable in size to regolith grains? Currently, there is neither direct observational evidence nor theoretical research addressing this question. This knowledge gap also hinders the rational preparation of icy lunar regolith simulants. In this study, we derive a theoretical model of Ostwald ripening under rarefied conditions, demonstrating that clusters of small water-ice particles (frost) within lunar regolith pores will undergo material migration and locally aggregate into large crystals over geological timescales. We quantitatively investigate the ripening rates of water-ice particle clusters under different temperature conditions. The theoretical results indicate that water-ice on the surface of ultra-low temperature PSRs region (<100 K) can retain its initial deposition morphology for extended periods, whereas in

基金项目: “十三五”国家重点研发计划变革性技术关键科学问题重点专项青年科学家项目(2021YFA0717200)

引用格式: 周孙鹏, 徐克. 月壤孔隙内水冰奥斯特瓦尔德熟化理论[J]. 空间科学与试验学报, 2025, 2(3): 11-18.

ZHOU S P, XU K. Ostwald ripening of water-ice particles in lunar regolith pore space[J]. *Journal of Space Science and Experiment*, 2025, 2(3): 11-18.

warmer non-PSRs or subsurface regions (>120 K), water-ice particle clusters will undergo significant coarsening, forming large crystals comparable in size to regolith grains. Based on these findings, we can prepare lunar regolith simulants with water-ice particle sizes matching those of target icy regolith by adjusting temperature and ripening time. This study not only advances the theoretical understanding of lunar water-ice evolution mechanisms but also provides a critical theoretical foundation for research on the physical properties of icy regolith and the preparation of simulants, offering significant application value for the exploitation and utilization of lunar water-ice resources.

Key words: lunar water ice; Ostwald ripening; icy lunar soil simulant

0 引言

建设月球科研站是人类探索和开发月球的重要一步,而确保安全、稳定的水资源供应是其中面临的关键挑战之一^[1-2]。现有研究表明^[3-5],由太阳风和火山释气等机制^[6]在月表产生的水分子会迁移沉积到月球极区,并在永久阴影区(Permanently Shaded Regions, PSRs)表面的冷阱(温度低于 110 K)中富集^[7],从而在极区表层月壤中形成总量可观的水冰^[6,8-9]。与从地球运输水资源相比,对月球水冰资源进行原位开发可能具有显著的成本优势^[6,10]。当前,针对月球水冰的原位探测与开采技术研究方向包括:动能侵彻式剖面探测^[11-12]、冻土钻探取水^[13-16]和传热传质数值模拟^[17-18]等。然而,目前尚无针对含冰月壤区域的直接采样或原位表征技术。

月球水冰资源的勘探与开发需要准确掌握水冰在月壤中的分布特征及其力学与热学性质。研究表明,永久阴影区表层沉积的水冰可能通过小行星撞击翻耕作用迁移至温度较高的深层月壤^[19-20],并在地温梯度驱动下重新分布^[21-22]。另外,在极端低温和真空环境下,这些水冰与月壤基质组成冰-壤胶结态组构^[23]。为了保障相关探月任务的顺利进行,具有高度拟真模拟含冰月壤的制备能力显得尤为必要^[23-25],以支持地面实验研究。

含冰月壤的力学与热学性质主要受含冰量和冰的微观结构所影响^[26-28]。然而,目前的含冰月壤模拟物制备缺乏统一的标准,且不同方法制备的含冰月壤内水冰的结晶位点,晶体形态,冰壤胶结状态等^[23-24,29]存在显著差异。通常认为,超高真空深低温的气相沉积法能够真实还原冷阱内月壤内水冰的形成过程^[24,29-30],形成霜结构(见图 1(a)),虽然其技术难度极高,但它能够在一定程度上真实反映永久阴影区表层水冰的初始沉积形态。

然而,水冰的初始沉积形态和当前的实际形态可能具有较大差异。分散的霜形态颗粒在漫长地质时间尺度内,可能通过扩散-再沉积机制逐渐降低其总表面能,最终转变为少量的大颗粒(见图 1(b))。这一演化过程被称为奥斯特瓦尔德熟化,也称为颗粒粗化^[31-32]。该现象常见于固溶体与液体溶胶,如二元合金、油水乳液、泡沫、纳米颗粒悬浮液等,最早由威廉·奥斯瓦尔德于 1896 年提出^[33]。经典的 Lifshitz-Slezov-Wagner (LSW) 理论^[34-35]基于分散相颗粒和周围溶液之间局部平衡的假设,分别推导出了扩散受限(扩散速率远小于相变速率)与源受限(扩散速率远大于相变速率)两种机制下的颗粒生长动力学规律:颗粒群的平均半径与时间的关系为 $\langle R \rangle \sim t^\beta$,其中在扩散受限的情况下 $\beta = 1/3$,源受限情况下 $\beta = 1/2$ 。Burlakov^[36]将奥斯特瓦尔德熟化

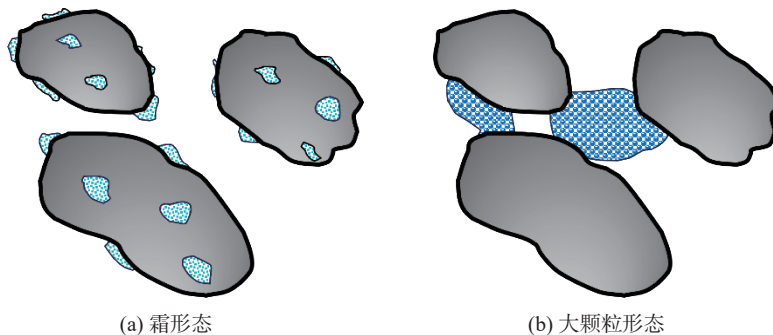


图 1 月壤内水冰的霜形态和大颗粒形态

Fig. 1 The frost form and large-grain form of water-ice in lunar regolith

理论拓展至稀薄气相环境,在分子自由程远大于颗粒大小但远小于颗粒间平均距离的条件下,通过假设分子从颗粒表面的发射通量与颗粒尺寸无关,推导出了类似于 Wagner^[35] 源受限形式的颗粒生长动力学方程。但该论文并没能给出颗粒群熟化速率的定量估计,也未讨论受限空间对动力学的影响。

本文基于稀薄条件下的奥斯特瓦尔德熟化理论,旨在探究地质时间尺度下月壤内水冰颗粒群的熟化演化规律,以揭示其现今可能的赋存形态(如霜状或大颗粒状)。在 Burlakov^[36] 熟化理论的基础上,本文修正了关键理论假设,推导出了稀薄场景下的奥斯特瓦尔德熟化方程,并据此估算了月壤中水冰的特征熟化时间。该理论可用于判断含冰月壤内水冰的赋存形态,从而为模拟月壤的制备参数提供重要指导。

1 物理情景与基本假设

本文对月球水冰赋存环境进行物理抽象,研究对象为含冰月壤典型孔隙内的水冰颗粒系统。假设孔隙内的水冰来自气相沉积,故孔隙尺寸远大于初始水冰颗粒尺寸。由于水冰内部孔隙网络互相结合,不同孔隙的物理性质均匀,且孔隙边界净通量为0,因此可将系统简化为封闭体系处理。水冰颗粒的表面积和体积分别由形状因子 α 和半径 r 表征,即 $\alpha 4\pi r^2$ 和 $\alpha 4\pi r^3/3$,其中 $0 < \alpha < 1$,反映出水冰颗粒在月壤表面的非球形附着形态。基于热弛豫时间远小于熟化特征时间的假设,认为形状因子在演化过程中保持不变。考虑到所有水冰颗粒的月壤基底是类似的,认为不同颗粒的形状因子差别不大。如图2所示,系统的初始条件为大量可升华固体颗粒均匀分布在远大于颗粒尺寸的封闭空间内。

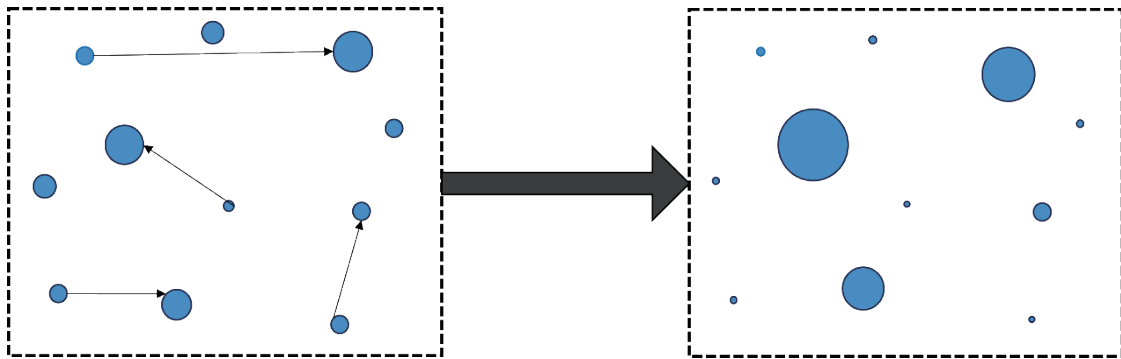


图2 月壤孔隙内,水冰颗粒群通过升华-沉积过程进行奥斯特瓦尔德熟化

Fig. 2 Ostwald ripening of water ice particle clusters in lunar regolith pores through sublimation-deposition processes.

水冰颗粒表面的分子以一定速率通过升华或脱附进入气相,并在自由飞行一段距离后,与另一个颗粒碰撞并发生凝华或吸附。颗粒的尺寸演化由净质量交换速率决定,即其分子发射速率与分子捕获速率的差值。由于月球表面气体极其稀薄^[37],气体分子的平均自由程远大于颗粒间距,因此气相分子间不发生碰撞,其轨迹为与颗粒碰撞前的直线运动(见图2)。

本文模型采用经典 LSW 理论^[34-35, 38] 的假设,具体如下:

(1) 颗粒群的总质量恒定,即在任意时刻,所有颗粒的总分子发射速率与总分子捕获速率相等。

(2) 固相的密度变化可忽略不计,颗粒的总体积守恒。

(3) 颗粒间距远大于颗粒自身尺寸,且不同颗粒表面单位面积的分子捕获速率相同。

(4) 颗粒的表面能是曲率半径的函数,遵循杨-拉普拉斯方程^[39]。

2 公式推导

2.1 发射通量与颗粒尺寸的关系

颗粒表面的分子发射通量由式(1)、式(2)给出。其中,式(1)为 Hertz-Knudsen 公式^[40],用于计算颗粒表面气体分子的升华通量 E ;式(2)为开尔文方程^[39],描述饱和蒸汽压受颗粒曲率的影响:

$$E = \frac{1}{4} n \bar{v} = \frac{p}{4k_B T} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (1)$$

式中, n 为分子数密度; $\bar{v}$ 为气体平均速率,即 $\sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$, m 为单个分子质量; p 为颗粒表面的饱和蒸汽压; k_B 为玻耳兹曼常数; T 为温度。

$$p = p_0 \exp\left(\frac{2\gamma\Omega}{k_B T r}\right) \quad (2)$$

式中, p_0 为平直表面(曲率为 0)的饱和蒸汽压, Ω 为单个分子体积, γ 为表面张力, r 为颗粒的曲率半径。需要注意的是, 尽管晶体不同晶面的曲率半径不同, 但在实际生长过程中, 通常不会形成完整的单晶, 而是形成多晶集合体。因此, 从宏观形貌上看, 可以近似视为球形颗粒, 上述方程近似成立。联立式(1)和式(2), 可以得到分子发射通量 E 随颗粒半径 r 的变化关系为:

$$E(r) = E(\infty) \exp\left(\frac{2\gamma\Omega}{k_B T r}\right) \quad (3)$$

式中, $E(\infty)$ 是指平直表面的发射通量, 即 $\frac{p_0}{4k_B T} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$ 。该结论与 Burlakov^[36] 熟化理论的发射通量与半径无关的假设不同。

表 1 列出了计算所需的关键物性参数。在月球冷阱环境(最低温度 40 K, 压强为 1×10^{-9} Pa^[8])下, 使用 iapws 包^[41] 计算水冰物性参数。由于水冰密度在随温度变化不大, 可以取 50 K 的数据(iapws 包无法计算 40 K 的密度), 计算得到分子体积为 $\Omega = 3.2 \times 10^{-29}$ m³。当颗粒半径取 1 μ m 时, 指数项 $2\gamma\Omega/k_B T r$ 为 0.01, 远小于 1。因此, 对于平均尺寸大于等于 1 μ m 的水冰颗粒群, 可对式(3)进行一阶泰勒展开:

$$E(r) = E(\infty) \left(1 + \frac{2\gamma\Omega}{k_B T r}\right) \quad (4)$$

表 1 本文使用的水冰物性参数

Table 1 Physical properties of water-ice used in this paper

物性参数/单位	数值
温度/K	>40 ^[8]
压强/Pa	1×10^{-9} ^[8]
水冰密度/(kg/m ³), 50 K	933 ^[41]
表面能/(MJ/m ²)	120 ^[42]
单个分子体积/m ³	3.2×10^{-29}
相对分子质量/Mr	18

2.2 颗粒半径演化方程与熟化速率方程

单个水冰颗粒的体积变化速率取决于其分子发射速率与分子捕获速率。分子发射速率等于颗粒表面积与发射通量的乘积, 具体表达式为 $\pi r^2 E(r)$ 。其中, 颗粒表面单位面积的分子捕获速率 I 与颗粒半径无关。根据质量守恒定律, 所有颗粒的分子捕获速

率之和等于所有颗粒的分子发射速率之和, 假定颗粒总数为 N , 即:

$$I = \frac{4\pi E(\infty) \sum_{i=1}^N \alpha_i \left(r_i^2 + \frac{2\gamma\Omega r_i}{k_B T}\right)}{\sum_{i=1}^N 4\pi \alpha_i r_i^2} \approx E(\infty) \left(1 + \frac{2\gamma\Omega}{k_B T} \frac{\langle r \rangle}{\langle r^2 \rangle}\right) \quad (5)$$

式中, $\sum$ 表示对体系中的所有颗粒求和, $\langle r \rangle$ 和 $\langle r^2 \rangle$ 分别表示体系内所有颗粒的半径均值和半径平方均值。基于不同颗粒的形状因子 α_i 相差不大, 将 $\langle \alpha r \rangle / \langle \alpha r^2 \rangle$ 近似为 $\langle r \rangle / \langle r^2 \rangle$ 。单个颗粒 i 的体积随时间 t 的变化可用以下微分方程表示:

$$\begin{aligned} \frac{dV_i}{dt} &= 4\pi \alpha_i r_i^2 \frac{dr_i}{dt} = 4\pi \alpha_i r_i^2 \Omega (-E(r) + I) = \\ &= 4\pi \alpha_i r_i^2 \frac{2\gamma\Omega^2}{k_B T} \left(\frac{\langle r \rangle}{\langle r^2 \rangle} - \frac{1}{r_i}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)简化, 得到单个颗粒半径随时间变化的微分方程:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{2\gamma\Omega^2}{k_B T} \left(\frac{\langle r \rangle}{\langle r^2 \rangle} - \frac{1}{r}\right) \quad (7)$$

式中, $(\cdot)$ 与 Burlakov^[36] 的结果相同, 根据 LSW 理论的源受限公式^[35, 38], 可得:

$$\langle r(t) \rangle^2 - \langle r(0) \rangle^2 = \frac{32}{81} E(\infty) \frac{\gamma\Omega^2}{k_B T} t = \frac{32}{81} \frac{p_0}{\sqrt{2\pi k_B T m}} \frac{\gamma\Omega^2}{k_B T} t \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 在稀薄环境中, 水冰颗粒群的平均半径随时间的 1/2 次方增长。式(8)的分母中存在温度的 1.5 次方项, 而分子中的 p_0 则和温度呈现更为敏感的指数正相关。这些因素综合作用, 导致达到特定尺寸的熟化时间与温度呈现显著的负相关性。

3 结果与讨论

3.1 月球环境下的冰晶熟化时间

基于式(8), 通过计算不同平均颗粒半径与温度所需的熟化时间(见图 3), 能够判断月球永久阴影区月壤孔隙中的水冰是否会在地质时间尺度下会自发形成大颗粒。假设初始粒径 $\langle r(0) \rangle$ 为 0 (或远小于月壤颗粒直径), 平直表面的水冰饱和蒸汽压 p_0 使用 iapws 包^[41, 43] 进行计算, 其他参数见表 1。图 3(a)中分别标出了宇宙年龄(137 亿年)、10 亿年、1 000 万年和 10 万年的参考线。具体分析如下:

(1) 在 100 K 以下的低温区内, 熟化时间极长,

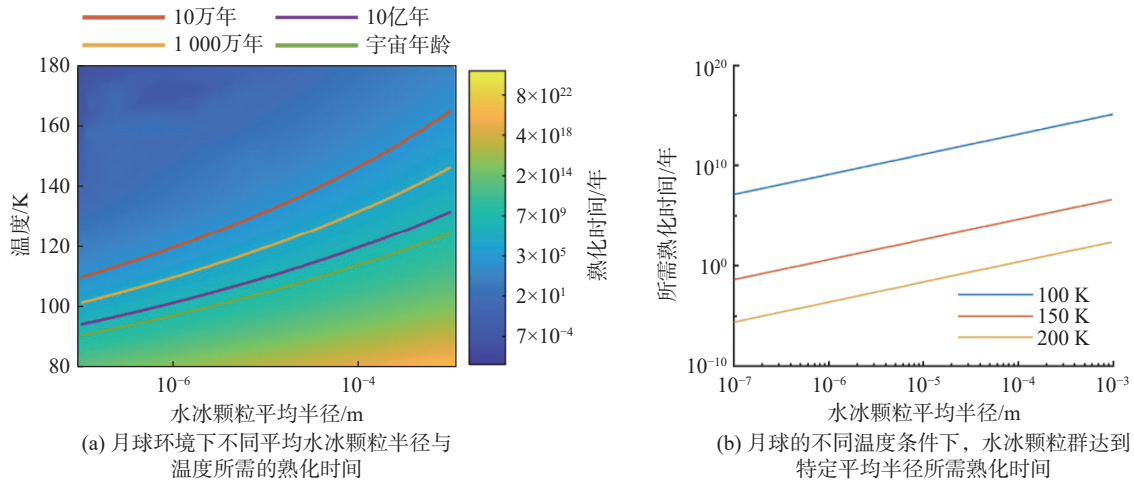


图3 月球环境下水冰颗粒群的熟化时间

Fig. 3 Ripening timescale of water-ice particle populations in the lunar environment

难以出现和月壤颗粒尺寸可比的水冰大颗粒。以 100 K 为例, 水冰颗粒群平均半径生长到 1 μm 需要的熟化时间达到了 13 亿年, 已达到水冰藏形成年限的量级^[44]; 长到 10 μm 则需要 1 300 亿年, 远超宇宙年龄。作为参考, 目前已发表的测量结果表明, 月壤堆积物的主要颗粒尺寸在 1~100 μm ^[8, 45]。因此, 可以认为在 100 K 以下的月壤中, 水冰的赋存形态能够维持最初通过气相沉积形成的结构, 如无定形冰^[46]与结霜形态^[47]。这种形态与粗化后的冰晶大颗粒在物理性质上存在显著差异。例如, 无定形冰的挥发性高于结晶冰^[48], 其热导率也较低^[49-50]。此外, 水冰小颗粒(霜)与粗化后大颗粒同月壤颗粒的结合形态不同, 这也会显著影响含冰月壤的传热及力学特性^[28]。

(2) 在 120 K 以上的区域内, 水冰熟化时间则显著缩短。理论计算表明, 在 120 K 环境下, 水冰颗粒可在 1 000 万年内熟化到 10 μm 的粒径; 在 150 K 环境下, 这一时间可以缩短至 1 000 年, 这在地质时间尺度上是非常短暂的。因此, 在这样的温度条件下, 水冰颗粒在勘查和开发时, 已经完成了孔隙内的熟化。在此基础上, 可能发生孔隙间的熟化^[51]。该机制可能产生多个月壤颗粒与冰的胶结, 提高热导率和含冰月壤的机械强度。

值得注意的是, 100~120 K 温度区间是水冰能否粗化到月壤尺寸的关键阈值范围。在此范围内, 水冰的平衡蒸汽压发生剧烈变化, 从 1.0×10^{-14} Pa 急剧升高至 2.5×10^{-10} Pa^[41], 导致熟化速率出现了 4 个数量级的差距。通常认为, 月球永久阴影区最表层

能够长期稳定存在水冰的必要条件是温度持续低于 110 K^[9], 而迁移至地下或非永久阴影区的水冰则可能存在于更高温度。因此, 可以得出以下结论: 在永久阴影区中, 温度低于 100 K 的深低温区域内的水冰几乎始终保持其沉积时的形态, 而温度稍高的区域则可能出现一定程度的粗化; 在永久阴影区的高温表面(非永久水冰赋存区)或深层, 月壤孔隙内的水冰颗粒会自发通过奥斯特瓦尔德熟化, 粗化生长为和月壤尺寸可比的晶体颗粒, 或者在单一孔隙中仅存单一晶体。

3.2 地球环境下制备含冰月壤模拟物的水冰颗粒的熟化时间

月壤模拟物的制备需要根据目标含冰月壤的特性, 灵活调节温度、熟化时间等参数, 以确保模拟样品中的水冰形态与真实含冰月壤保持一致。具体而言, 制备模拟含冰月壤时, 需要通过精确控制制备条件, 使模拟月壤中水冰的平均粒径与实际月壤相匹配。在地球常压环境(1×10^5 Pa)下, 水冰颗粒的熟化过程可以使用经典 LSW 理论的扩散受限模型进行估算, 其平均粒径随时间的变化方程如下:

$$\langle r(t) \rangle^3 - \langle r(0) \rangle^3 = \frac{8D\gamma\Omega^2c}{9k_B T} t \quad (9)$$

式中, c 表示平直相界面(曲率为 0)对应的平衡态分子数密度, 即饱和蒸汽压对应的分子数密度。根据理想气体状态方程, 该密度可计算为 $p_0/k_B T$ 。 D 为扩散系数, 可通过 $\bar{v}\lambda/3$ 进行估算。 $\lambda = k_B T / \sqrt{2}\pi d^2 p$ 为分子平均自由程, d 为水分子直径, 取 0.4 nm, p 为环境气压 10^5 Pa。基于式(9), 假设初始粒径 $\langle r(0) \rangle$

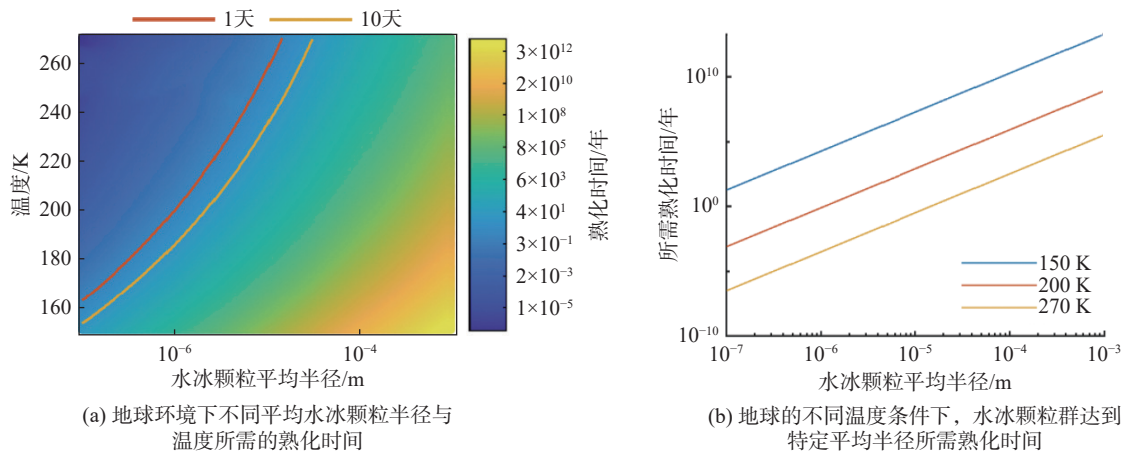


图4 地球环境下水冰颗粒群的熟化时间

Fig. 4 Ripening timescale of water-ice particle populations in Earth

为0, 计算得到不同温度和目标颗粒平均半径所需的熟化时间, 如图4所示。图4(a)分别标注了1天和10天的参考线。结果表明:

(1) 在模拟永久阴影区表层未熟化的含冰月壤时, 制备和保存的温度应尽可能低。例如, 若希望水冰的平均尺寸在 $1\ \mu\text{m}$ 以下, 当制备和保存温度为 $150\ \text{K}$ 时, 基本不用考虑熟化过程; 而当保存温度在 $200\ \text{K}$ 时, 则保存时间不应超过 $17\ \text{h}$ 。

(2) 模拟水冰粗化程度较高的含冰月壤时, 可通过在适当高温条件下进行熟化处理来实现。基于式(8)、式(9), 可根据目标月壤中水冰的特征粒径, 精准确定制备所需的温度和时间参数组合。例如, 当水冰颗粒的平均半径达到 $10\ \mu\text{m}$ 时, 在 $270\ \text{K}$ 下仅需要 $7.2\ \text{h}$ 的熟化时间, 而在 $250\ \text{K}$ 下需要 $45\ \text{h}$ 。但是, 若要求的水冰颗粒平均半径达到 $100\ \mu\text{m}$, 即使在 $270\ \text{K}$ 的条件下, 所需的熟化时间也长达1年。更高的温度则超过了水的三相点, 这显然不符合实际情况, 因此只能选择机械混合等方法进行制备。

3.3 理论的局限性

本文所构建的稀薄环境熟化理论具有较广的适用性, 不仅可以描述月壤内水冰颗粒的演化过程, 还能够推广到甲烷、二氧化碳等挥发分物质, 以及描述星云中的物质聚集^[36]。但是, 该理论存在以下局限性:

(1) 理论框架基于热力学平衡假设, 无法有效描述月壤内可能存在的动力学过程。例如, 当存在由日照引起的温度梯度驱动传质^[21]等现象, 封闭体系的假设将不再适用, 理论预测结果可能存在显著偏差。

(2) 对于粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的小颗粒, 式(4)的线性化处理会产生一定误差, 导致低估颗粒的分子发射通量, 并高估了该粒径范围所需的熟化时间。但这种误差不会导致结果出现数量级的差异。

(3) 该理论未充分考虑月壤表面和孔隙形态的具体影响。这会导致理论结果和实际情况可能在同一个数量级上出现一定偏差。

(4) 本文结论对无定形冰更为准确; 而对于晶体水冰, 由于其并非完全各向同性, 结论也可能在同一个数量级上出现一定偏差。但这一偏差可以通过修正形状因子 α 来进行校正。

(5) 由于涉及的时间尺度较大, 难以通过实验室实验结果直接支持本文理论。未来对月球含冰月壤的直接观测将为该理论提供更为直接的验证依据。

4 结语

本文推导了稀薄环境下挥发分颗粒的奥斯特瓦尔德熟化模型, 揭示了地质时间尺度下月球极区含冰月壤中水冰的演化规律与赋存形态。研究结果表明:

(1) 稀薄环境下, 挥发分颗粒群的平均粒径会逐渐增大, 满足与时间的 $1/2$ 次方关系; 而在地球环境下, 挥发分颗粒群的平均粒径与时间的 $1/3$ 次方关系成正比。

(2) 月球永久阴影区表层深低温区域(温度低于 $100\ \text{K}$)的水冰能够长期保持初始气相沉积形成形态, 几乎不发生显著的熟化现象; 而在 $100\sim 120\ \text{K}$ 温度区域内。水冰会出现一定程度的粗化。

(3) 当水冰迁移到 $120\ \text{K}$ 以上温度区域时, 会通过奥斯特瓦尔德熟化逐渐生长, 并在远小于水冰藏

寿命的时间尺度下完成局部粗化。例如,在 150 K 的温度条件下,水冰颗粒群的平均粒径在约 1 万年内可超过月壤粒径。

本文提出的理论模型为含冰月壤模拟物的制备提供了理论指导。通过调节温度和熟化时间参数,可控制含冰月壤模拟物内含的水冰平均粒径,从而提升模拟物与真实含冰月壤的相似度,为准确解析含冰月壤的物理性能提供更可靠的参考依据。

参 考 文 献

- [1] 张泽旭,袁帅,潘文特,等.月球驻人基地研究综述与关键技术分析[J].深空探测学报(中英文),2023,10(5):455-469.
- [2] 裴照宇,王琼,姜生元,等.面向月球科研站的原位资源利用活动展望[J].前瞻科技,2024,3(1):9-21.
- [3] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [4] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 463-468.
- [5] LI S, MILLIKEN R E. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon mineralogy mapper: Distribution, abundance, and origins[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1701471.
- [6] 王超,张晓静,姚伟.月球极区水冰资源原位开发利用研究进展[J].深空探测学报(中英文),2020,7(3):241-247.
- [7] LAFERRIERE K L, BRAMSON A M, GLEASON A. Quantities of ballistically hopping water molecules on the Moon: consistent with exospheric hydration observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2025, 130(4): e2024JE008628.
- [8] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar sourcebook, a user's guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 36-305.
- [9] HAYNE P O, AHARONSON O, SCHÖRGHOFER N. Micro cold traps on the Moon[J]. *Nature Astronomy*, 2020, 5(2): 169-175.
- [10] 杨孟飞,邹志刚,汪卫华,等.月球资源开发利用的进展与展望[J].中国空间科学技术,2024,44(1):1-10.
- [11] 姜生元,张伟伟,杨宇彬,等.动能侵入式星壤物性原位触探技术研究进展[J].深空探测学报(中英文),2022,9(2):114-122.
- [12] ZHU J, TANG J, CHI C, et al. Penetration based lunar regolith thermal conductivity inversion: Method and verification[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 226: 414-426.
- [13] 杨阳,王庆功,王超,等.可持续性月球水资源提取利用设计与分析[J].中国空间科学技术,2023,43(6):100-111.
- [14] LIU Y, WANG C, PANG Y, et al. Water extraction from icy lunar regolith by drilling-based thermal method in a pilot-scale unit[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 202: 386-399.
- [15] 王庆功,王超,庞勇,等.含冰星壤钻取密封与水资源提取转化技术研究[J].深空探测学报(中英文),2022,9(6):617-624.
- [16] CHI G, ZHANG Z, TANG J, et al. Quantitative sampling and thermal extraction of the lunar regolith for lunar volatile exploration: Method and validation[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 220: 274-282.
- [17] YANG Y, WANG Q, GU J, et al. Numerical simulation of mass and heat transfer for water extraction from icy lunar regolith[J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(11): 6205-6221.
- [18] FORMISANO M, DE SANCTIS M C, BOAZMAN S, et al. Thermal modeling of the lunar south pole: Application to the PROSPECT landing site[J]. *Planetary and Space Science*, 2024, 251: 105969.
- [19] CANNON K M, BRITT D T. A geologic model for lunar ice deposits at mining scales[J]. *Icarus*, 2020, 347: 113778.
- [20] CANNON K M, DEUTSCH A N, HEAD J W, et al. Stratigraphy of ice and ejecta deposits at the Lunar poles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(21): e2020GL088920.
- [21] SCHÖRGHOFER N, AHARONSON O. The lunar thermal ice pump[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 788(2): 169.
- [22] REISS P, WARREN T, SEFTON-NASH E, et al. Dynamics of subsurface migration of water on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(5): e2020JE006742.
- [23] 刘君巍,汪恩良,田野,等.月壤水冰组构模拟及力学特性测试分析[J].深空探测学报(中英文),2022,9(2):134-140.
- [24] RICARDO D, HODGKINSON J, AKBAR RHAMDHANI M, et al. A review on the preparation techniques and geotechnical behaviour of icy lunar regolith simulants[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 72(10): 4553-4581.
- [25] LIU J, ZHANG W, CUI J, et al. Extreme low-temperature freezing process and characteristic curve of icy lunar regolith simulant[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 202: 485-496.
- [26] 赵宇,季节,田野,等.含冰模拟月壤切削削负载试验研究[J].深空探测学报(中英文),2022,9(6):606-616.
- [27] LIU J, ZHANG W, TIAN Y, et al. Analysis and prediction of uniaxial compressive strength of icy lunar regolith under extreme temperature[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(12): 4391-4407.
- [28] SIEGLER M, AHARONSON O, CAREY E, et al. Measurements of thermal properties of icy Mars regolith analogs[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E3): E03001.
- [29] TEOLIS B, SARANTOS M, SCHÖRGHOFER N, et al. Surface exospheric interactions[J]. *Space Science Reviews*, 2023, 219(1): 4.
- [30] MOORES J E. Lunar water migration in the interval between large impacts: Heterogeneous delivery to Permanently Shadowed Regions, fractionation, and diffusive barriers[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, 121(1): 46-60.
- [31] VOORHEES P W. The theory of Ostwald ripening[J]. *Journal of Statistical Physics*, 1985, 38(1): 231-252.
- [32] ALEXANDROV D V. On the theory of Ostwald ripening: formation of the universal distribution[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2015, 48(3): 035103.

- [33] 董妍惠. NaREF4 纳米晶体的奥斯瓦尔德熟化过程与表面猝灭机制的研究 [D], 2024.
- [34] LIFSHITZ I M, SLYOZOV V V. The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1961, 19(1): 35-50.
- [35] WAGNER C. Theorie der Alterung von Niederschlägen durch Umlösen (Ostwald-Reifung)[J]. *Zeitschrift für Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 1961, 65(7-8): 581-591.
- [36] BURLAKOV V M. Ostwald ripening in rarefied systems[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(15): 155703.
- [37] 徐克, 周孙鹏, 杨阳, 等. 月壤多孔介质中水分子原位扩散规律研究进展[J]. *空间科学与试验学报*, 2024, 1(3): 6-16.
- [38] BRAY A J. Theory of phase-ordering kinetics[J]. *Advances in Physics*, 1994, 43(3): 357-459.
- [39] 范康年. 物理化学(第2版) [M]. 2005: 642-643.
- [40] PERSAD A H, WARD C A. Expressions for the evaporation and condensation coefficients in the Hertz-Knudsen relation[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(14): 7727-7767.
- [41] FEISTEL R. Thermodynamics of water, vapor, ice, and seawater[J]. *Accreditation and Quality Assurance*, 2008, 13(10): 593-599.
- [42] SKAPSKI A, BILLUPS R, ROONEY A. Capillary cone method for determination of surface tension of solids[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1957, 26(5): 1350-1351.
- [43] WAGNER W, RIETHMANN T, FEISTEL R, et al. New equations for the sublimation pressure and melting pressure of H₂O ice Ih[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2011, 40(4): 043103.
- [44] BENNA M, HURLEY D M, STUBBS T J, et al. Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(5): 333-338.
- [45] LI C, HU H, YANG M-F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission[J]. *National Science Review*, 2021, 9(2): nwab188.
- [46] COCKS F H, KLENK P A, WATKINS S A, et al. Lunar ice: Adsorbed water on subsurface polar dust[J]. *Icarus*, 2002, 160(2): 386-397.
- [47] JIA Y, ZHANG Z, QIN L, et al. Research of lunar water-ice and exploration for China's future lunar water-ice exploration [J]. *Space: Science & Technology*, 2023, 3: 0026.
- [48] SACK N J, BARAGIOLA R A. Sublimation of vapor-deposited water ice below 170 K, and its dependence on growth conditions[J]. *Physical Review B*, 1993, 48(14): 9973-9978.
- [49] ANDERSSON O, SUGA H. Thermal conductivity of low-density amorphous ice[J]. *Solid State Communications*, 1994, 91(12): 985-988.
- [50] KOUCHI A, GREENBERG J, YAMAMOTO T, et al. Extremely low thermal conductivity of amorphous ice-relevance to comet evolution[J]. *Astrophysical Journal*, 1992, 388: L73-L76.
- [51] YU Y, WANG C, LIU J, et al. Bubble coarsening kinetics in porous media[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(1): e2022GL100757.

作者简介:

周孙鹏(2002-), 男, 博士研究生。主要研究方向为地外天体水资源开发。

通信地址: 北京大学燕南园 60 号(100871)

电子邮箱: 2301111759@stu.pku.edu.cn

徐克(1989-), 男, 博士, 研究员。主要研究方向为多孔介质内的物质输运和地质能源开发。(本文通信作者)

通信地址: 北京大学燕南园 60 号(100871)

电子邮箱: kexu1989@pku.edu.cn