

月壤水冰原位开采过程中热质传递特性数值研究

牛亚丰¹, 陈慧¹, 王璿², 李得天², 戴浩¹, 何成旦², 刘迎文¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 730000, 兰州)

摘要: 为节省地面构建月球永久阴影区环境的试验成本,并缩短月壤水冰原位开采方案设计周期,构建了高真空、极低温环境下,月壤内水冰升华的变物性数值仿真模型。基于被动式光热水冰开采方案,同时考虑传热和压差驱动升华,预测了水冰开采过程中的升温、升华和扩散过程;展示了月壤内,水冰含量、温度场和压力场的空间分布和时间变化;分析了不同光辐照度、含水率和月壤孔隙直径下的水冰升华过程。研究表明:空间分布上出现了明显的开采平面,开采平面两侧的温度梯度和压力梯度显著不同;压力随时间的变化呈现波动状态,且与水冰升华速率的波动同步。水冰升华速率随着光辐照度的增加、含水率的增加和月壤孔隙直径的增加而增加,能量效率随着光辐照度的减小、含水率的增加和月壤孔隙直径的增加而增加。该研究全面地揭示了水冰开采过程中的热质传递特性,并且为水冰开采系统的多设备集成仿真研究奠定了基础。

关键词: 月壤水冰;热质传递;升华;扩散;数值仿真

中图分类号: V11 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202606011 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0132-11

Numerical Study of Heat and Mass Transfer Characteristics During *In-Situ* Mining of Water Ice in Lunar Regolith

NIU Yafeng¹, CHEN Hui¹, WANG Jin², LI Detian², DAI Hao¹, HE Chengdan², LIU Yingwen¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physical Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To reduce the experimental cost of reproducing lunar permanently shadowed regions on Earth and to shorten the design cycle for an *in-situ* mining plan of water ice in lunar regolith, a variable-property numerical model was developed to simulate sublimation of water ice in lunar regolith under high-vacuum, cryogenic conditions. Based on a passive photothermal water ice mining plan and accounting for both heat transfer and pressure difference-driven sublimation, the heating, sublimation and diffusion processes during water ice mining were predicted. Spatial distributions and temporal evolutions of water ice content, temperature field and pressure field within the lunar regolith were presented, and the water ice sublimation behavior was analyzed under varying solar irradiance, water content and lunar regolith pore diameter. Results indicated that, a distinct mining plane was formed, on both sides of which temperature and pressure

收稿日期: 2025-09-18。 作者简介: 牛亚丰(1998—),女,博士生;李得天(通信作者),博士生导师,中国工程院院士。
基金项目: 民用航天技术预先研究项目(D010302)。

网络出版时间: 2026-01-06

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260105.1629.008>

gradients differed markedly; pressure exhibited temporal fluctuations that were synchronous with variations in the water ice sublimation rate. The water ice sublimation rate was found to increase as solar irradiance, water content and lunar regolith pore diameter increased. Energy efficiency was observed to increase with decreasing solar irradiance, increasing water content and increasing lunar regolith pore diameter. This study comprehensively provides insight into the heat and mass transfer characteristics during water ice mining, and lays a foundation for numerical studies by integrating multiple devices for water ice mining systems.

Keywords: water ice in lunar regolith; heat and mass transfer; sublimation; diffusion; numerical simulation

在未来深空探测中,水资源的获取与转化是地外天体原位资源利用的重要环节^[1]。地外水资源的利用可以为空间探测任务提供推进剂和其他消耗品,实现原位补给,降低空间发射和飞行成本,使星际探测和空间经济更具实用性和可行性,是持续开展深空探测的重要途径^[2]。月球由于距离地球最近,且对其的探索工作开展较久,较容易获得原位资源,被认为是早期地外原位资源利用的理想目标。LCROSS 和 LRO 的观测证实了月球两极附近的永久阴影区内存在大量以冰形式存在的水^[3-4]。Nature Geoscience 杂志报道月球上可能存在一个蓄水量达 2 700 亿 t 的巨大储水库^[5]。这些研究为月球原位水资源的开采和利用提供了依据。

针对地外水冰资源的采集,科学家们相继提出了适用于其存在形式、所处环境条件和热物理特性的原位水资源利用方案。根据不同方案中对土壤的处理方式不同,可将其分为被动式^[2,6-7]和主动式^[8-14]。主动式方案大多需要对土壤进行钻孔,由于含冰月壤的硬度较高,钻孔所需能量较多,这为能量的持续供给带来了挑战。同时,月球永久阴影区为极低温环境,这对钻杆的强度和系统可靠性提出了很高的要求。此外,钻具机构的复杂结构将导致设备体积和重量较大,从而增加发射成本。相比之下,不需要钻孔的被动式光热采水方案在能量来源的可持续性、系统结构的可靠性上具有更多的优势,并且可以扩大采水面积、提高水冰提取量上限。当前,各方案仍处于实验验证阶段,仍需对不同方案的可行性和性能表现进行探索对比。本文将基于被动式光热采水方案展开研究,针对该类方案存在的采水速率低和能量利用效率低的问题,探究提升采水速率和能量利用率的改进方向。

在地面模拟月面永久阴影区环境的成本较高,为了缩短方案设计周期并降低试验成本,利用数值仿真的手段对方案的可行性和性能进行评估和优化更为高效。Reiss^[15]从解吸和吸附的角度解释水冰

升华行为,提出了月球水冰原位提取的传热传质模型,并通过 COMSOL Multiphysics 进行了瞬态数值模拟,探究了含水率、堆积密度和加热速率对升华速率及温压分布的影响。Formisano 等^[16]通过数值计算的方法探究了不同含水率对采水速率的影响。Brisset 等^[17]通过三维数值模拟对比了表面加热和插入钻头加热的提取效率,并分析了不同加热方式下的水冰升华机制。Zhu 等^[18]结合水冰升华与多孔介质分形理论,研究了月球水冰的升华和扩散过程。Yang 等^[19]进行了二维数值仿真,描述了水冰开采过程中的水汽迁移过程。

这些研究从不同的角度对水冰升华过程进行了描述,研究对象以钻孔型水冰开采为主,对被动光热式的研究较少。本研究将在现有模型的基础上,整合水冰传热、升华和扩散过程,并进一步将传热速率对水冰升华的影响考虑在内,建立变物性数值模型,预测被动式光热采水方案的采水表现,揭示月壤内水冰升华、扩散过程与温压变化的相互作用,并且给出对水冰升华速率和能量效率有影响的重要参数,从而为月球原位水资源开采的被动式光热方案提供优化设计方向。

1 理论模型和数值求解

1.1 物理过程的理论模型

1.1.1 物理过程描述

本文基于被动光热式采水方案展开研究,该方案的工作原理如图 1 所示。在月球光照区布置并展开太阳能聚光系统,将聚光系统收集到的太阳光,经过光纤或反射器传输至二次分光元件上,经过二次分光元件的太阳光被分散到帐篷(如图 1 所示)内的月壤表层。月壤表层接收到的热量向下传递,月壤及其中的水冰吸热升温,待温度高于升华温度(压力低于饱和蒸气压),水冰升华为水蒸气并在月壤中扩散,逸出月壤的水蒸气进入帐篷,迁移至冷阱中凝华后被收集。在月壤内的热量传递和水冰的升华、扩散是水冰

开采的重要物理过程,因此我们将水资源的开采分为传热过程、升华过程和扩散过程来建立数值模型。

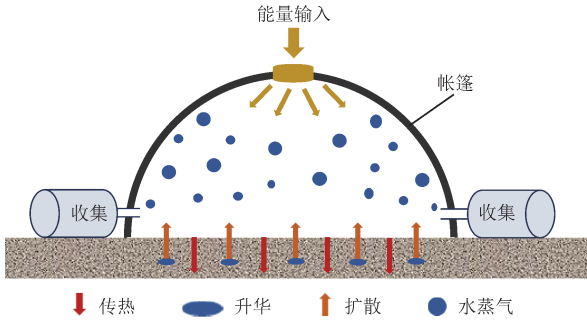


图1 被动式光热采水方案工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle for passive photothermal water ice mining

1.1.2 传热过程

热量从月壤表层向更深处的扩散作用于采水过程的全阶段,根据能量守恒定律,传热过程的控制方程为

$$\rho_{\text{eff}} c_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + q_{\text{sub}} = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) \quad (1)$$

式中: T 为月壤与水冰混合物的温度; q_{sub} 为水冰升华潜热,在没有达到升华条件时, $q_{\text{sub}} = 0$; ρ 为密度; c 为热容; λ 为热导率。下标 eff 表示月壤与水冰混合物的有效热物性。我们将月壤看作多孔介质的基底,孔隙率记为 φ ,孔隙中水冰的体积填充分数为 f 。月壤和水冰混合物的有效热物性由各组分的加权平均获得,表达式如下

$$\rho_{\text{eff}} = \rho_s + \varphi f \rho_i + \varphi(1-f) \rho_v \quad (2)$$

$$c_{\text{eff}} = [\rho_s c_s + \varphi f \rho_i c_i + \varphi(1-f) \rho_v c_v] / \rho_{\text{eff}} \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_s + \varphi f \lambda_i + \varphi(1-f) \lambda_v \quad (4)$$

式中:下标 s、i、v 分别表示月壤、水冰和水蒸气。

月壤的堆积密度 ρ_s 与深度 h 的关系如下^[20]

$$\rho_s = 1.92 \times 10^3 \frac{h + 0.122}{h + 0.180} \quad (5)$$

由于被动式光热采水方案开采的是表层月壤中的水冰资源,因此我们取 $h=0$ 。

水冰开采过程中,月壤与水冰的温度变化较大,本文对随温度变化较大的参数采用了变物性模型。月壤质量热容 c_s 表达式^[21],水冰密度 ρ_i 、水冰热容 c_i 表达式^[22],水冰热导率 λ_i 随温度变化的表达式^[16] 分别为

$$c_s = aT^3 + bT^2 + cT + d \quad (6)$$

$$\rho_i = 917(1 - 1.17 \times 10^{-4}(T - 273.15)) \quad (7)$$

$$c_i = 185 + 6.89T \quad (8)$$

$$\lambda_i = 567/T \quad (9)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 均为系数,取值为 $a = 13.112 \times 10^{-8}$,

$b = -1.21176 \times 10^{-5}$, $c = 5.72364 \times 10^{-3}$, $d = -0.189972$ 。文献[21]考虑了月壤自身导热特性及其颗粒间的辐射传热,给出了更大温度范围内、更准确的月壤热导率随温度的如下表达式

$$\lambda_s = k_0 + k_3 T^3 \quad (10)$$

式中: k_0 和 k_3 均为随密度变化的系数,当月壤的堆积密度为 $1300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, $k_0 = 0.0012$, $k_3 = 2.4177 \times 10^{-11}$ 。

水蒸气热导率随压力变化的表达式为^[15]

$$\lambda_v = \frac{\lambda}{1 + 2\beta Kn} \quad (11)$$

式中: β 为水蒸气的比热比, $\beta = 1.4$; Kn 为特定压力下的克努森数。

值得注意的是,干燥月壤的热导率极低,与水冰的热导率相差 3 个数量级,因此水冰的含量会极大地影响月壤与水冰混合物的热导率。由式(4)计算得到含水率为 10% 时的热导率是含水率为 1% 时的 10 倍左右,而含水率为 1% 时的热导率是干燥月壤的约 100 倍。这一特点将会对采水过程中的物理场时空变化以及水冰升华速率产生较大的影响。

1.1.3 升华过程

当月壤中的水冰温度达到升华温度时,水冰对应的饱和蒸气压 p_s 等于当地的水蒸气分压 p ,此时如果继续升温,水冰将会升华为水蒸气。水冰升华为水蒸气需要有足够的压差驱动和热量供给,因此,水冰的升华速率同时受限于压差和传热速率。Hertz-Knudsen 方程^[23]提供了处于高真空状态下,在压差驱动下的水冰升华速率 $m_{\text{diff,p}}$,其表达式为

$$m_{\text{diff,p}} = S \nu_{\text{ice}} \alpha (p_s - p) \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{0.5} \quad (12)$$

式中: S 为比表面积,根据参考文献[15],本研究取为固定值,即 $S = 500 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; ν_{ice} 为水冰的赋存密度; M 为水蒸气的摩尔质量, $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

α 是升华系数,文献[24]中给出的升华系数与温度关系式为

$$\alpha = \frac{0.854}{1 + e^{-11580(T^{-1} - 0.00499)}} + 0.146 \quad (13)$$

饱和蒸气压 p_s 选用文献[25]中提供的公式进行计算,其表达式为

$$p_s = \exp(9.550426 - 5723.265/T + 3.53068 \ln T - 0.00728332T) \quad (14)$$

月壤中的热量传递方式主要是导热,根据傅里叶导热定律,表层向下层传递的热量 q 的表达式为

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (15)$$

式中: x 为计算域内的月壤深度。

因此,在传热限制下的水冰升华速率 $m_{\text{diff-q}}$ 为

$$m_{\text{diff-q}} = q/q_{\text{sub}} \quad (16)$$

式中: q_{sub} 为水冰的升华潜热, $q_{\text{sub}} = 2.8 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

同时,考虑到传热速率和压差驱动产生的升华量,更加符合实际的水冰升华速率 m_{diff} 的表达式为

$$m_{\text{diff}} = \min(m_{\text{diff-p}}, m_{\text{diff-q}}) \quad (17)$$

1.1.4 扩散过程

菲克第一定律适用于计算稀薄气体的扩散通量 J , 其表达式为

$$J = -D_{\text{eff}} \nabla \rho_v \quad (18)$$

式中: D_{eff} 为有效扩散系数。文献[13]中指出, 扩散方式主要分为普通扩散和克努森扩散, 有效扩散系数由这2种方式的有效扩散系数 $D_{\text{O-eff}}$ 、 $D_{\text{K-eff}}$ 以并联的方式获得

$$1/D_{\text{eff}} = 1/D_{\text{O-eff}} + 1/D_{\text{K-eff}} \quad (19)$$

$$D_{\text{O-eff}} = \frac{\rho}{\tau} D_{\text{O}} \quad (20)$$

$$D_{\text{K-eff}} = \frac{\rho}{\tau} D_{\text{K}} \quad (21)$$

$$D_{\text{O}} = \frac{l}{3} \bar{v} \quad (22)$$

$$D_{\text{K}} = \frac{d_v}{3} \bar{v} \quad (23)$$

式中: τ 为月壤曲折度; D_{O} 为普通扩散系数; D_{K} 为克努森扩散系数; d_v 是月壤间隙的孔隙直径; $\bar{v}$ 是水分子的平均热速度; l 是月壤中水蒸气的平均自由程, 与气体压力 p 和温度 T 密切相关, 其表达式为

$$l = \frac{k_B T}{\sqrt{2} p \pi d_g^2} \quad (24)$$

式中: k_B 是波尔兹曼常数, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; d_g 是粒子直径, 对于水分子, $d_g = 2.8 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。

1.2 模型假设

为了保证计算结果准确的前提下, 尽可能简化代码, 以实现理论模型的数值求解, 本模型的假设如下:

- (1) 月壤表面的热量输入是均匀的;
- (2) 不考虑采水装置的边缘效应, 进行一维计算;
- (3) 同一计算单元内, 月壤与水冰的温度一致, 满足热平衡假设;
- (4) 升华后的水蒸气在月壤孔隙中会迅速扩散, 在每个计算单元内压力是均匀的;
- (5) 进入帐篷的水蒸气在极短时间内被冷阱捕获。

1.3 程序实现

编写 Matlab 代码实现了 2.1 节中理论模型的

瞬态求解。采用有限差分法, 对传热和密度扩散方程进行离散化处理。为了保证模型的数值稳定和收敛, 需要满足柯朗-弗里德里希斯-列维(CFL)条件, 即 CFL 数小于 0.5。模型选择的网格高度为 0.1 mm, 时间步长为 $\Delta t = 0.01 \text{ ms}$ 。在传热计算时, 热导率使用调和平均值。初始设定每个网格单位的月壤质量为 m , 计算总时长为 t_0 。在每一个时间步中, 先对所有网格单元进行传热计算, 以更新月壤和水冰混合物温度, 当网格单元内的压力小于饱和蒸气压时, 水冰开始升华, 升华后的水蒸气由下层月壤传递至上一层月壤中。在每一次时间步结束后, 根据压力和温度的变化, 更新各网格单元的热物性。理论模型数值计算流程图, 如图 2 所示。

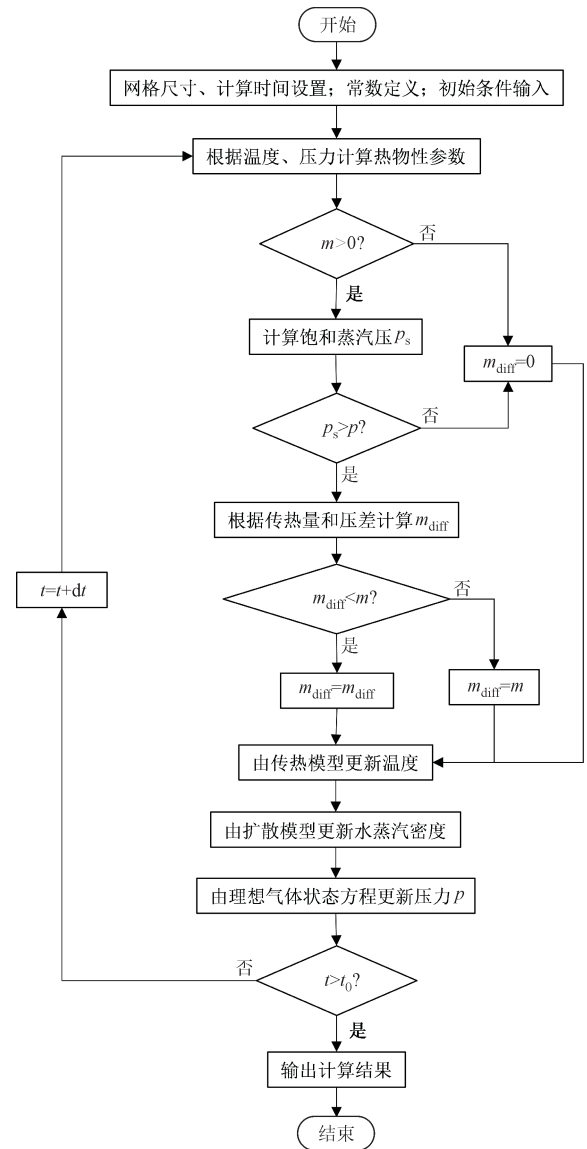


图2 理论模型数值计算程序流程图

Fig. 2 Flowchart of numerical calculation for theoretical model

1.4 变量取值和边界条件

边界条件的设定基于被动式光热采水方案的场景。以采样深度为 0.01 m, 采样面积为 1 m² 的含水冰月壤作为研究对象, 其计算域的示意如图 3 所示。图中, i 为网格层数。

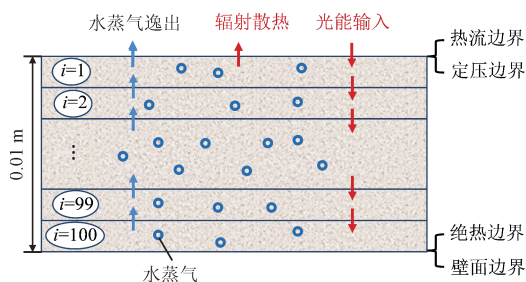


图3 水冰月壤计算域范围和边界条件示意图

Fig. 3 Schematic of computational domain and boundary conditions for lunar regolith with water ice

假设下边界与外界没有物质和能量交换, 设置为壁面边界和绝热边界。表层月壤与大气环境接触, 升华后的水蒸气可以直接进入大气环境中, 将其设置为定压边界。在月球永久阴影区内, 二次分光元件将聚光镜收集的光能分配到表层月壤。表层月壤设置为热流边界, 热流密度的大小等于光辐照度减去表层向温度为 40 K 环境的辐射热流。辐射热流 q_r 由斯特藩-玻尔兹曼定律计算, 其表达式为

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_0^4 - T_a^4) \quad (25)$$

式中: ε 为表层月壤的发射率; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; T_0 和 T_a 分别为表层月壤温度和大气环境温度。

本研究中涉及的物理量取值如表 1 所示。选择月壤孔隙直径、体积含水率和光辐照度为变量, 探究其对采水速率和能量效率的影响。

表1 本研究涉及的重要参数和变量取值

Table 1 Values of key parameters and variable involved in this study

参数	数值
孔隙率 ^[16]	0.5
月壤曲折度 ^[26]	2
月壤孔隙直径/ μm	1, 2, 5, 10
表层月壤发射率 ^[27]	0.95
体积含水率/%	1.0, 2.0, 5.0, 7.5, 10.0
环境压力/Pa	0.01, 10.00, 50.00, 100.00
光辐照度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	250, 500, 1 000, 1 500, 2 000

1.5 模型验证

为了验证本文模型 Matlab 代码的可靠性, 将本模型的计算结果与利用 Ansys Fluent 安装包中有限元模型的仿真结果进行对比, 并对其中的传热和升华模块进行了验证。这 2 种方法采用的物性参数和边界条件保持一致, 计算域深度为 0.02 m, 水冰升华量随时间变化曲线的对比如图 4 所示。结果显示, 其最大差距小于 2%。然而, 本文模型计算结果相较有限元模型整体偏大, 这是因为 Fluent 中的二维模型在计算域边缘有热量流出, 造成少量的能量浪费。该结果证明了本文代码在离散方法和理论模型上的可靠性。

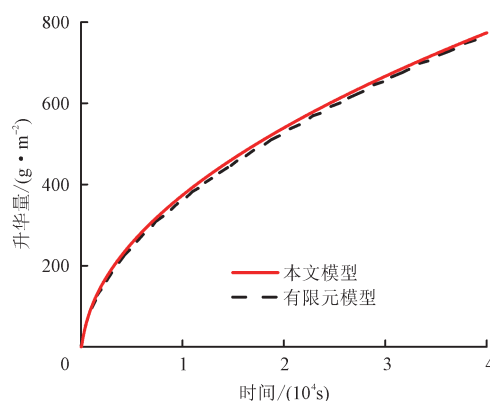


图4 本文模型与有限元模型水冰升华量计算结果的对比

Fig. 4 Comparison of water ice sublimation mass calculated by the proposed model and finite element method

2 水冰升华的时空特性

本节展示了计算域内, 物理场的空间分布和时间变化, 关注水冰赋存状态、温度场和压力场。其中, 固定月壤孔隙直径为 10 μm 、体积含水率为 5%、环境压力为 0.01 Pa、输入的光辐照度为 1 000 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 总计算时长为 3 600 s。

2.1 水冰升华量

为了明确压差驱动和传热驱动哪个是限制升华的因素, 统计了一段时间内的压差驱动升华速率和热驱动升华速率, 结果如图 5 所示。热驱动计算得到的升华速率是平稳变化的, 而压差驱动计算得到的升华速率在热驱动升华速率附近波动, 没有哪种机制的影响远大于另一种。图 5(b) 为取两者中较小值后的升华速率结果, 该结果表明, 同时考虑 2 种机制可以避免只考虑某一种驱动机制导致的结果偏大。

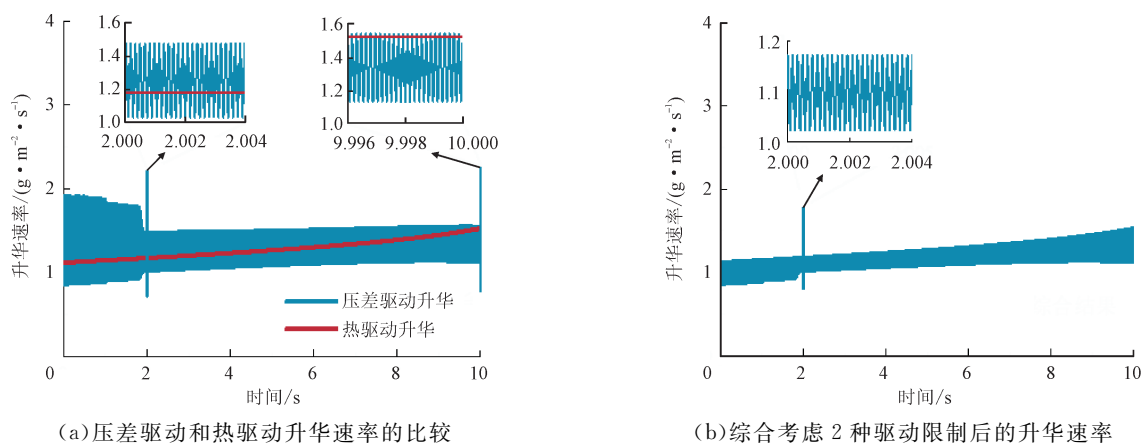


图5 不同驱动下的水冰升华速率

Fig. 5 Sublimation rates of water ice under different driving condition

图6(a)给出了不同时刻下,水冰含量随深度的分布。随着时间的推移,实现了更深处的水冰开采,且存在明显的开采平面表明,水冰的开采是逐层向下进行的。在2 500 s后,开采平面以下出现了少量的水冰升华,这表明开采时间较长时,深层的水冰也会受到扰动从而出现少量升华。图6(b)展示了0~3 600 s内的水冰升华量和升华速率的变化。在490 s时,水

冰开始了升华,但是经过较短时间的升华后,升华速率再次变为0,升华量保持不变。这是因为,当水冰开始升华后,水蒸气的突然产生使得月壤内的压力增加,因此需要一定时间使月壤和水冰混合物加热至更高的温度才能达到新的升华温度。在可以较为稳定地实现水冰升华后,可以看到水冰升华速率呈现一种波动状态,这是压力与水冰升华之间的相互作用导致的。

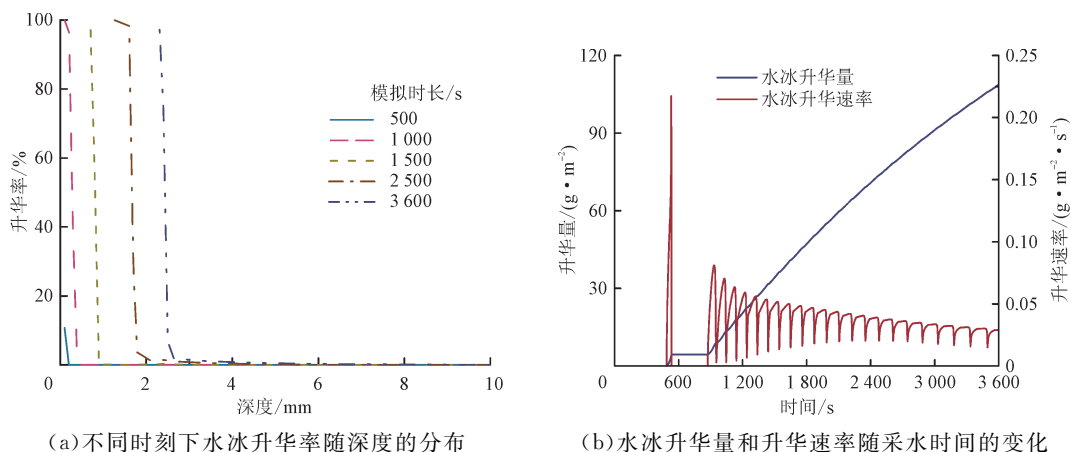


图6 水冰升华量的时空特性

Fig. 6 Spatial and temporal characteristics of water ice sublimation

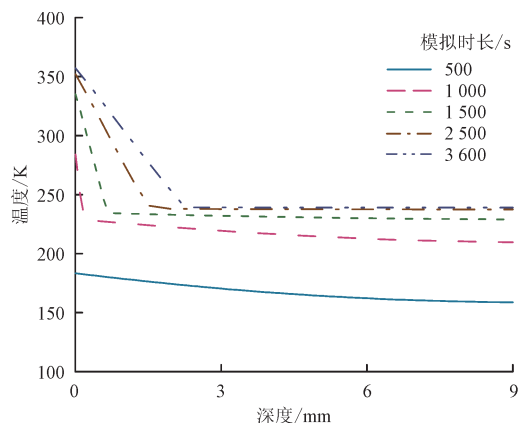
2.2 温度变化

图7(a)展示了采水过程中不同时刻下的温度随深度分布结果。在每个时刻,最高温度都位于表层(深度为0),最低温度都位于底层(深度为10 mm)。在500 s时,表层温度和底层温度分别为183.3、158.6 K,相较于初始的40 K,升温较快且温差较小。这是因为,此时表层水冰还未完全升华,导热系数一致且大于干燥的月壤。在1 000 s时,开采平面两侧(即水冰升华完全区域和未升华区域)出现了不同的温度梯度,这是因为升华完全的区域只含有干

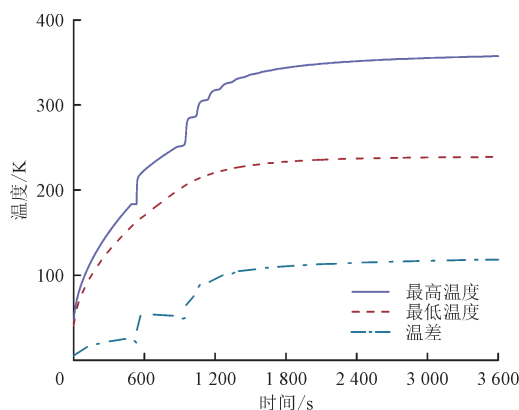
燥月壤,干燥月壤的热导率在200 K时只有约 $0.0019 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,远小于月壤水冰混合物,因此温度梯度会大于未升华区域。随着时间的推移,未升华区域的温度梯度越来越小。这是因为,随着表层温度的升高,向环境的辐射热流也会越大,实际进入月壤的能量也越少。

图7(b)给出了最高温度、最低温度和温差随时间的变化,最高温度的变化在开始升华后的一段时间内是不平滑的。这是因为,水冰的升华并不是连续的;在水冰升华时,热量主要作为升华潜热;在没有水

冰升华时,热量主要作为显热使温度升高;随着采水时间的延长,最高温度逐渐趋于定值。趋于定值这一现象是因为,表面的辐射热量、输入的光辐照度和向月壤深处传递的热量近乎平衡。同时,最低温度则越来越接近开采平面处的温度,即在升华温度附近。



(a)不同时刻下温度随深度的分布



(b)最高温度、最低温度和温差随采水时间的变化

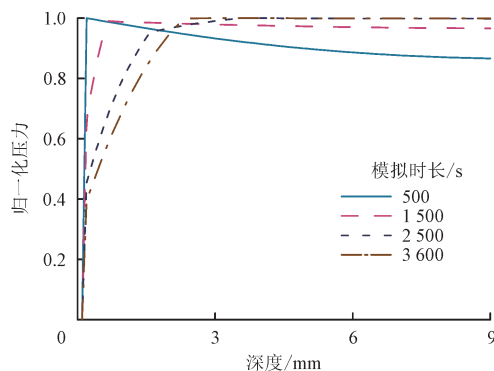
图7 采水过程温度的时空特性

Fig. 7 Spatial and temporal characteristics of temperature in the water mining process

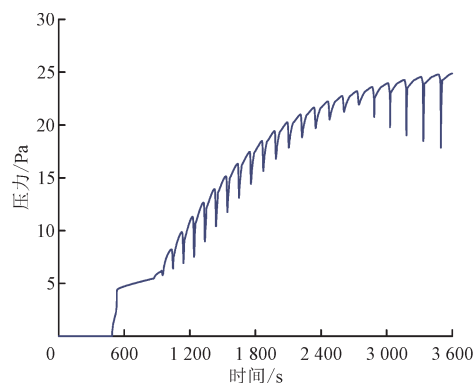
2.3 压力变化

图8(a)和8(b)分别为采水过程压力的空间分布和时间变化。将压力的空间分布以计算域内的最大压力进行归一化处理,可以发现,在不同时刻下的最大压力都出现在开采平面处,因为在开采平面处产生的水蒸气逐渐向表层月壤以及更深处扩散。随着时间的推移,开采平面以下未开采区域的压力基本保持一致。另外,最大压力的变化是波动的,这是压力与水冰升华速率相互影响所导致的。图8(c)同时比较了最大压力与水冰升华速率随时间的变化,可以看到,最大压力与水冰升华速率的增减是同步的。这是因为,水冰升华速率的增加意味着水蒸气的增加,会使得开采平面处的压力增加。这将导致该压力与饱和压力的差

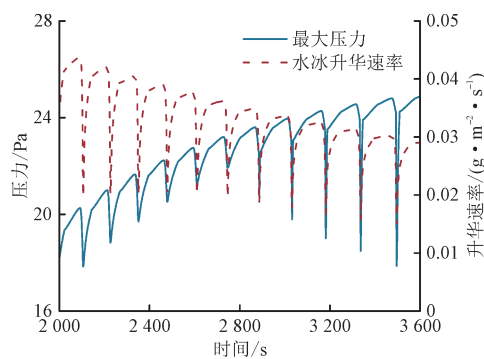
值减小,升华温度升高,水蒸气的升华速率减小,而这个过程又使得最大压力开始减小。如此的相互影响,最终使得压力和升华速率呈现出同步的波动。



(a)不同时刻下归一化压力随深度的分布



(b)月壤内最大压力随采水时间的变化



(c)月壤内最大压力与水冰升华速率随采水时间的变化

图8 采水过程压力的时空特性

Fig. 8 Spatial and temporal characteristics of pressure in the water mining process

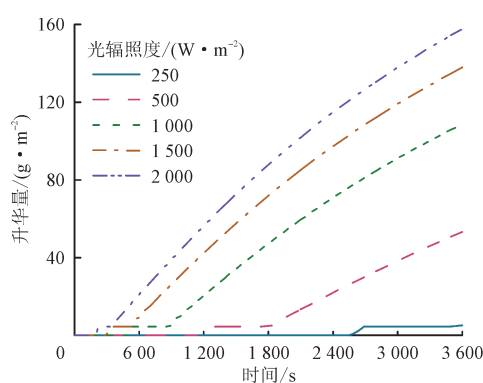
3 参数影响分析

通过第2节对不同物理场的时空特性分析,明确了采水过程中月壤内的热质传递规律,接下来将探究重要参数对水冰升华速率和能量效率的影响,为水资源提取方案的设计和优化提供思路。

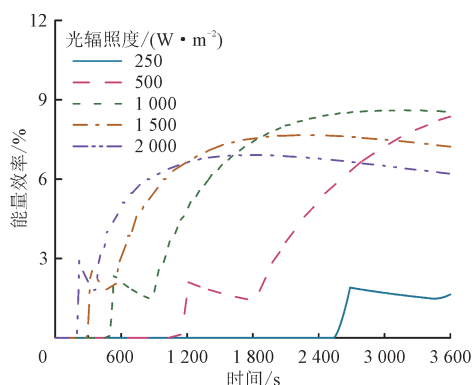
3.1 光辐照度的影响

光辐照度是被动式光热采水方案中的能量供

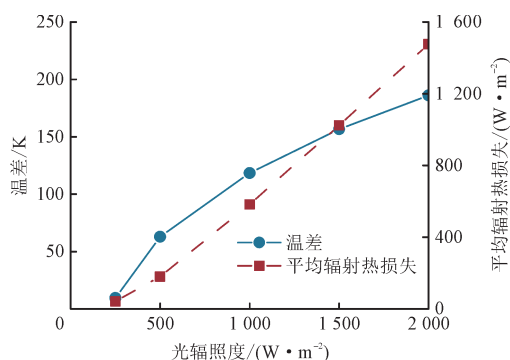
给。不同光辐照度的结果如图9所示。当光辐照度从 $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到 $2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,水冰开始升华的时间由 2538 s 缩短至 195 s 。并且光辐照度越大,升华速率也越大。将水冰汽化吸收的潜热占总供给光能的比例定义为能量效率,1 h 内能量效率随时间的变化如图9(b)所示。由图可知,能量效率会先增加,并在某一时间达到峰值。当光辐照度从 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到 $2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,能量效率峰值逐渐减小,达到峰值所需的时间变短。图9(c)说明了这一趋势的原因,光辐照度的增加使得温差增加,导致向环境辐射损失的热量和加热干燥月壤的热量增加。



(a) 不同光辐照度下水冰升华量随时间的变化



(b) 不同光辐照度下能量效率随时间的变化



(c) 温差和平均辐射热损失随光辐照度的变化

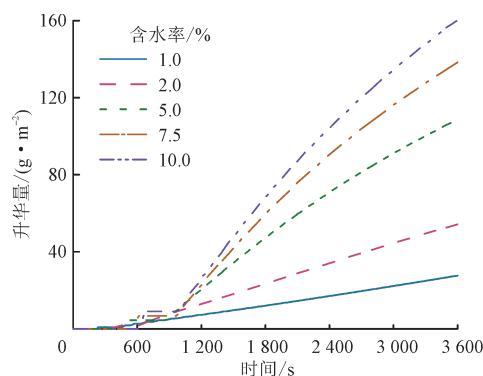
图9 不同光辐照度的影响

Fig. 9 Influence under different solar irradiances

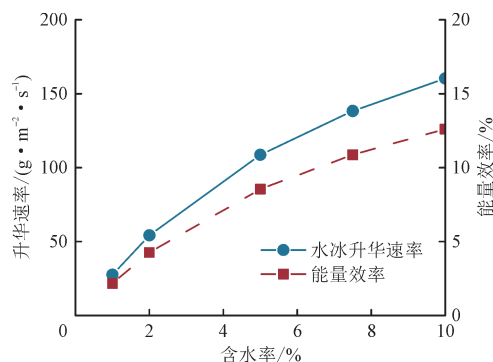
值得一提的是,当光辐照度太小 ($250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 时,只有很少的水冰升华,此时的能量主要用于月壤和水冰的升温,1 h 内还未达到能量效率的最大值,即使可预见的峰值效率将会较高,但在采水时间有限时是不可取的。因此光辐照度的选择需要在升华速率和能量效率之间进行折中,并根据采水系统的运行成本选择光辐照度。

3.2 含水率的影响

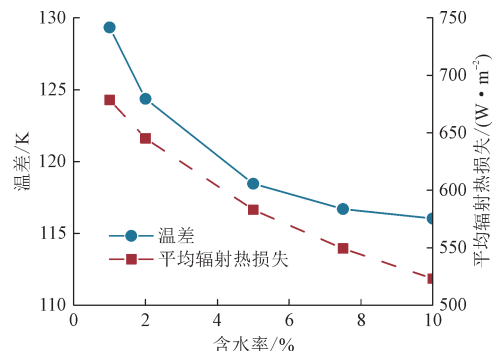
选取含水率为1%、2%、5%、7.5%和10%的月壤探究含水率对采水速率和能量效率的影响。由图10(a)可知,含水率越低,水冰开始升华的时间越早。这是因为较低的含水率对应较小的导热系数,使得表层月壤的热量难以向深处传递,导致表层月壤升温更快,从而更早地到达升华温度。



(a) 不同含水率下水冰升华量随时间的变化



(b) 水冰升华速率和能量效率随含水率的变化



(c) 温差和平均辐射热损失随含水率的变化

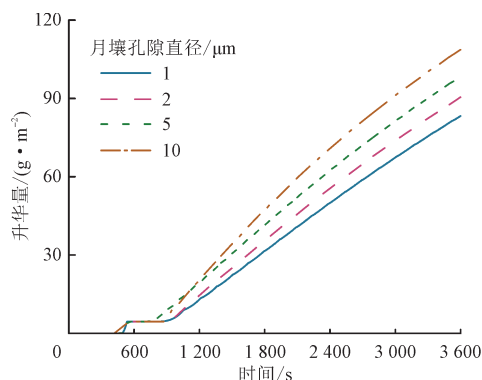
图10 不同含水率的影响

Fig. 10 Influence of different ice contents

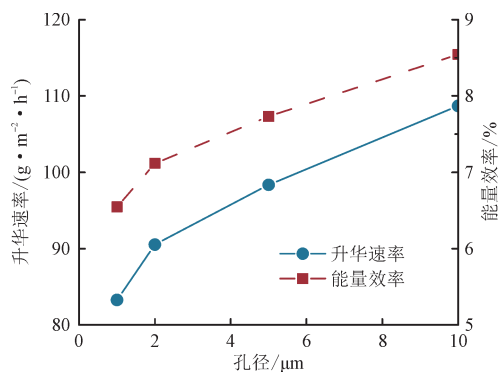
图 10(b)显示随着含水率的增加,水冰升华速率和能量效率都在增加。由图 10(c)可知,随着含水率的增加,一方面平均辐射热损失在减小,表明进入月壤中的热量在增加;另一方面采水区域内的温差在降低,表明用来加热干燥月壤的热量占比在减小,更多的热量用于水冰的加热和升华。这两方面共同促成了高含水率下的高能量效率。因此,在含水率较高的区域开展采水活动是最佳选择,含水率对水冰升华速率和能量效率的重要影响强调了对水冰资源探测技术的需求。

3.3 月壤孔隙直径的影响

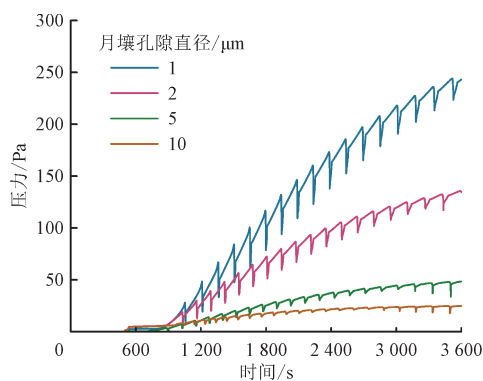
在扩散模型中,月壤孔隙直径的大小是影响水蒸气扩散速率的重要参数,水蒸气扩散速率、压力与水冰升华速率之间具有很强的耦合关系。因此,对比了月壤孔隙直径分别为 1、2、5、10 μm 时的采水性能,结果如图 11 所示。图 11(a)和(b)的结果表明:随着孔隙直径的增加,水冰升华速率和能量效率都会有所增加,水冰开始升华的时间基本一致。图 11(c)中最大压力的变化可以解释这一趋势:孔隙小说明扩散越慢,无法及时扩散的水蒸气聚集在月壤中导致最大压力的增加,其对应的升华温度也越高,从而需要更多的热量将月壤与水冰混合物加热至更高的温度。这将导致供给水冰升华潜热的能量占比下降,需要更长的能量供给时间。



(a) 不同月壤孔隙直径下水冰升华量随时间的变化



(b) 水冰升华速率和能量效率随月壤孔隙直径的变化



(c) 不同月壤孔隙直径下最大压力随时间的变化

图 11 不同月壤孔隙直径的影响

Fig. 11 Influence of different regolith pore diameters

该结果表明:快速的扩散过程对采水是有利的,在开展采水活动时,可以选择月壤孔隙较大的区域。此外,将升华完全的干燥月壤及时移除也将有利于水冰的开采。

在被动式光热采水方案中,水蒸气逸出月壤后进入到帐篷内,如果集水装置的设计不够高效,使得集水速率小于水冰升华速率时,无法及时被收集的水蒸气会使得整个系统的操作压力不断增加。这与水蒸气无法在月壤中及时扩散的效果是一致的。因此可以预见,当系统长时间运行时,帐篷内的压力也将呈现波动的状态,并且集水系统的效率越高,压力波动范围也将越小,水冰升华速率也会越快。

4 结论与展望

本研究基于被动式光热采水方案,将月壤内的热质传递过程分为传热、升华和扩散,构建了高真空、极低温环境下,月壤内水冰升华的变物性物理模型,预测了计算域内多物理场的时空特性,并且探究了影响水冰升华速率和能量效率的重要因素。本文得到如下主要结论。

(1) 压差和传热都可能成为水冰升华的限制因素,只考虑其中一种升华机制可能会使计算结果偏高;变物性对计算结果的影响很大,尤其是热导率随水冰含量的变化。

(2) 存在明显的开采平面,最大压力位于开采平面处,并且开采平面两侧具有不同的温度梯度。月壤内压力变化呈现波动状态,并且与水冰升华速率同步。

(3) 水冰升华速率随着光辐照度、含水率和月壤孔隙直径的增加而增加,能量效率随着光辐照度的减小、含水率的增加和月壤孔隙直径的增加而增加。因此,应尽量选择折中的光辐照度、高含水率和较大

的月壤孔隙直径区域开展采水活动。此外,可以定时清除开采平面以上的干燥月壤,设计高效的集水装置,保证水蒸气的及时迁移。

我们认识到采水速率和能量效率受到多种因素的影响,高效采水需要各个装置的高效配合。因此,水蒸气在帐篷内的碰撞迁移,与在集水装置中的再凝华过程同样重要,应进行集成分析。接下来我们将以本研究开发的模型代码为基础,开展采水系统多装置协同作业的研究工作。

参考文献:

- [1] GREIG A D, JURADO N I, MENDOZA P A, et al. Increasing water vapor transportation rates from lunar regolith by utilizing an ionization method [C]//ASCEND 2021. Reston, VA, USA: AIAA, 2021: AIAA 2021-4046.
- [2] SOWERS G F, DREYER C B. Ice mining in lunar permanently shadowed regions [J]. *New Space*, 2019, 7(4): 235-244.
- [3] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume [J]. *Science*, 2010, 330(6003): 463-468.
- [4] GLADSTONE G R, HURLEY D M, RETHERFORD K D, et al. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume [J]. *Science*, 2010, 330(6003): 472-476.
- [5] HE Huicun, JI Jianglong, ZHANG Yue, et al. A solar wind-derived water reservoir on the moon hosted by impact glass beads [J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(4): 294-300.
- [6] 李居平, 李丹明, 党文强, 等. 火星土壤水分光热采集方法可行性分析 [J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(6): 584-588.
LI Juping, LI Danming, DANG Wenqiang, et al. Feasibility analysis of moisture acquisition from martian soil under solar radiation [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 584-588.
- [7] ETHERIDGE E C, KAUKLER W. Microwave processing of planetary surfaces for the extraction of volatiles [C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2011: AIAA 2011-612.
- [8] WIENS J, BOMMARITO F, BLUMRNSTEIN E, et al. Water extraction from martian soil [C]//Fourth Annual HEDS-UP Forum. [S.l. : s. n.], 2001: 11-25.
- [9] LINNE D L, KLEINHENZ J E. Extraction and capture of water from martian regolith experimental proof-of-concept [C]//9th Symposium on Space Resource Utilization. Reston, VA, USA: AIAA, 2016: AIAA 2016-0226.
- [10] HOFFMAN S J, ANDREWS A D, WATTS K D. Simulated water well performance on mars [C]//AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2018: AIAA 2018-5293.
- [11] ZACNY K, CHU P, PAULSEN G. Mobile *in-situ* water extractor (MISWE) for mars, moon, and asteroids in situ resource utilization [C]//AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2012: AIAA 2012-5168.
- [12] WASILEWSKI T G. Evaluation of drilling-based water extraction methods for martian ISRU from mid-latitude ice resources [J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 158: 16-24.
- [13] 何立臣, 王超, 姚伟. 含冰模拟月壤水资源提取实验研究 [J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(5): 511-518.
HE Lichen, WANG Chao, YAO Wei. Experimental study of water resource extraction from frozen lunar regolith simulants [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(5): 511-518.
- [14] 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.
WANG Chao, ZHANG Xiaojing, YAO Wei. Research prospects of lunar polar water ice resource *in-situ* utilization [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 241-247.
- [15] REISS P. A combined model of heat and mass transfer for the in situ extraction of volatile water from lunar regolith [J]. *Icarus*, 2018, 306: 1-15.
- [16] FORMISANO M, DE SANCTIS M C, DE ANGELIS S, et al. Prospecting the moon: numerical simulations of temperature and sublimation rate of a cylindric sample [J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 169: 8-14.
- [17] BRISSET J, MILETICH T, METZGER P. Thermal extraction of water ice from the lunar surface: a 3D numerical model [J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 193: 105082.
- [18] ZHU Fulong, ZHANG Weiwei, WANG Lingxin, et al. Modeling and analysis for volatile characteristics of lunar water ice [J]. *Acta Astronautica*, 2024, 220: 162-172.
- [19] YANG Yang, WANG Qinggong, GU Junping, 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.

- [20] 罗祖分, 宋保银, 曹西. 考虑热物性变化的月壤温度数值模拟 [J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(3): 70-76.
- LUO Zufen, SONG Baoyin, CAO Xi. Numerical simulation of lunar soil temperature considering its variable thermal properties [J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(3): 70-76.
- [21] JONES W P, WATKINS J R, CALVERT T A. Temperatures and thermophysical properties of the lunar outermost layer [J]. The Moon, 1975, 13(4): 475-494.
- [22] FUKUSAKO S. Thermophysical properties of ice, snow, and sea ice [J]. International Journal of Thermophysics, 1990, 11(2): 353-372.
- [23] SONG Hongqing, ZHANG Jie, NI Dongdong, et al. Investigation on *in-situ* water ice recovery considering energy efficiency at the lunar South pole [J]. Applied Energy, 2021, 298: 117136.
- [24] GUNDLACH B, SKOROV Y V, BLUM J. Outgassing of icy bodies in the solar system: I the sublimation of hexagonal water ice through dust layers [J]. Icarus, 2011, 213(2): 710-719.
- [25] MURPHY D M, KOOP T. Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131(608): 1539-1565.
- [26] HEIKEN G, VANIMAN D, FRENCH B M. Lunar sourcebook: a user's guide to the moon [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1991.
- [27] HAYNE P O, BANDFIELD J L, SIEGLER M A, et al. Global regolith thermophysical properties of the moon from the diviner lunar radiometer experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2017, 122(12): 2371-2400.

(编辑 刘懿莹)