

# 火星原位建造材料研究进展与展望\*

程杉杉<sup>1,2</sup> 余伟<sup>3</sup> 高玉月<sup>1,2</sup>  
周燕<sup>1,2</sup> 文世峰<sup>1,4</sup> 周诚<sup>1,2</sup>

1(华中科技大学 国家数字建造技术创新中心 武汉 430074)

2(华中科技大学土木与水利工程学院 武汉 430074)

3(东南大学材料科学与工程学院 南京 211189)

4(华中科技大学材料科学与工程学院 武汉 430074)

**摘要** 火星风化层作为一种重要的原位自然资源,在火星基础设施建设上具有重要作用.基于与地球上不同的火星极端环境与土壤特殊性质,系统研究了火星原位建造材料的物理特征与机械性质,重点分析了土壤类混凝土材料(具体包括含硫混凝土、聚合物混凝土、地聚物混凝土与水凝胶基混凝土)、土壤熔融与烧结原位固化材料两个方面的最新研究进展.尽管目前火星原位建造材料的研究已取得一定成果,但仍面临诸如聚合物混凝土原位制备困难、熔融与烧结过程能耗较大,以及在火星环境下建造材料服役性能不足等局限问题.根据火星原位建造材料在未来的发展方向,研究结果旨在积极推进对火星原位建造材料的深入研究,为实现火星原位建造提供借鉴与参考.

**关键词** 火星风化层, 原位资源, 混凝土, 熔融, 烧结

**中图分类号** V552

## Research and Prospect of *In-situ* Construction Materials on Mars

CHENG Shanshan<sup>1,2</sup> SHE Wei<sup>3</sup> GAO Yuyue<sup>1,2</sup>  
ZHOU Yan<sup>1,2</sup> WEN Shifeng<sup>1,4</sup> ZHOU Cheng<sup>1,2</sup>

1(National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

2(School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

3(School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189)

4(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** Martian regolith has gradually become a consensus as an important *in-situ* natural resource

\* 中国工程院战略研究与咨询项目 (2023-JB-09-10, 2023-XZ-90) 和国家重点研发计划项目 (2021YFF0500300, 2023YFB3711300) 共同资助

2023-11-26 收到原稿, 2023-12-28 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

for building habitats and infrastructure on Mars. As more and more research focusing on *in-situ* utilization of Martian regolith, this article provides a comprehensive review of construction materials based on Martian regolith. However, it is necessary to consider the vastly different environmental conditions on Mars compared to Earth, such as low gravity, near vacuum, large temperature differences, cosmic ray radiation and so on. Similarly, due to the unique chemical composition, particle size, porosity, as well as thermal and mechanical properties of Martian regolith, it also brings several certain difficulties for *in-situ* production of construction materials on Mars. As a result, based on the extreme environment of Mars and the special properties of Martian regolith, this article provides a detailed overview of the preparation process and physical and mechanical characteristics of *in-situ* construction materials. Then, the research progress in two aspects of various Martian regolith-based concrete materials (including sulfur concrete, polymer concrete, geopolymers concrete, hydrogel-based concrete), Martian regolith-based melting and sintering materials is further emphasized. Moreover, this article systematically compares the preparation conditions and *in-situ* utilization rates of each construction material and analyzes both the advantages and weakness of their preparation processes in the special Martian environment. Finally, the problems and limitations of the above-mentioned materials in Martian *in-situ* construction are pointed out, including difficulties in production of polymer concrete, high energy consumption during melting and sintering processes, and insufficient service performance of construction materials in Martian environments. Accordingly, in order to provide useful references for the realization of *in-situ* construction on Mars in the future, the development direction of construction materials has been proposed in three aspects, which are the improved methods of anhydrous concrete represented by polymer concrete, optimization of melting and sintering processes and development of new materials suitably adapted to the environment.

**Key words** Martian regolith, *In-situ* resources, Concrete, Melting, Sintering

## 0 引言

在太阳系中火星是除地球外最宜居的行星。近年来,包括美国、欧盟、中国和俄罗斯在内的诸多国家和组织都宣布将在未来几十年内发射载人火星任务<sup>[1-3]</sup>。欧空局和俄罗斯航天局联合研制的 ExoMars 2016 火星探测器于 2016 年发射,其轨道器在当年 10 月成功进入火星轨道。NASA 的 Insight 任务计划于 2018 年启动探索火星内部结构,并在 2020 年成功发射毅力号火星探测器。此外,作为中国首个探测火星的探测器,2021 年天问一号成功获得了火星表面的漫游车图像。随着人类火星探测的进一步推进<sup>[4]</sup>,火星基地的建造成为一项重要的任务。

火壤(火星风化层)蕴藏着丰富的资源,是探索火星的重要物质基础。一方面,以火壤为原料制备的混凝土是在火星上开展原位建造基地的理想材料,且不同类型的混凝土材料在火星环境中各有不同的应用优势。另一方面,在干燥的火星环境中烧结(或熔融)火壤也可以形成具有一定强度的建筑构件。此外,利用烧结技术可从火星风化层资源中制造烧结矿物、

玻璃、纤维等材料,且生产过程较为简单。

为此,根据已知的火星极端环境和火壤基本性质,本文综述了近年来通过原位资源利用制备火星建筑材料的相关研究,并具体分析了火壤类混凝土材料、火壤熔融和烧结原位固化材料的物理特征与力学性质,梳理总结了当前制备与应用火星原位建造材料面临的局限与挑战,以期为未来的火星原位建造材料提供借鉴与参考。

## 1 火星极端环境与火壤性质

对火星极端环境和火壤特殊性质的认知是开展火星原位建造的基础。与地球不同,火星拥有独特的环境条件,主要包括低重力、近真空、大温差、宇宙射线辐射等。另外,火壤和地球上的土壤在物质组成、粒径以及热学、力学性质等方面也存在较大差异。本节将对上述火星极端环境和火壤特殊性质进行具体介绍。

### 1.1 火星极端环境

火星是太阳系中离地球最近的类地行星,表 1 列

表 1 地球、月球和火星之间的差异  
Table 1 Differences between Earth, Moon and Mars

| 参数                                     | 地球                       | 月球                     | 火星                       |
|----------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| 质量/kg                                  | $5.9 \times 10^{24}$     | $7.2 \times 10^{22}$   | $6.4 \times 10^{23}$     |
| 直径/km                                  | 12742                    | 3474                   | 6779                     |
| 表面积/ $\text{km}^2$                     | $5.11 \times 10^8$       | $37.9 \times 10^6$     | $144.8 \times 10^6$      |
| 表面重力/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | 9.81                     | 1.62                   | 3.71                     |
| 地震能量/ $(\text{J} \cdot \text{a}^{-1})$ | $10^{17} \sim 10^{18}$   | $10^{10} \sim 10^{14}$ | —                        |
| 大气压/kPa                                | 101.3                    | $3 \times 10^{-13}$    | 0.7                      |
| 主要组成                                   | $\text{N}_2, \text{O}_2$ | —                      | $\text{CO}_2, \text{Ar}$ |
| 表面极端温度/ $^{\circ}\text{C}$             | $-89.2 \sim 56.9$        | $-195 \sim 120$        | $-143 \sim 35$           |
| 昼夜周期/h                                 | 23.9                     | 656                    | 24.7                     |
| 轨道周期/d                                 | 365.3                    | 29.5                   | 687                      |
| 年平均辐射/mSv                              | 2.4                      | 380                    | 100                      |
| 与地球的距离/km                              | —                        | $384.4 \times 10^3$    | $54.6 \times 10^6$       |

出了地球、月球和火星之间的参数差异<sup>[5]</sup>. 尽管火星的一些特征与地球非常相似, 例如火星上的一天与地球一日时长近乎相同, 且火星同地球一样都有季节的变化<sup>[6]</sup>. 但火星上仍存在对人类建造、生产生活带来挑战的极端环境条件, 通常表现在较低的重力、稀薄的大气环境、较大的昼夜温差以及辐射影响.

由表 1 可知, 火星的质量及体积均比地球小, 较低的火星重力 (约为地球重力的 38%) 导致了稀薄的大气环境、极端的温度循环以及对空间风化 (即辐射和微陨石) 的微弱屏障. 此外, 由于火星缺乏活跃的构造板块, 火星地震的频率也较高. 据 Oberst 和 Nakamura 等<sup>[7]</sup> 估计, 火星地震比月震更加频繁, 大多数观测到的火星地震是由于热循环收缩引起的裂缝、地下岩浆爆发和陨石撞击等作用产生的.

和地球不同的是, 火星的大气层主要由二氧化碳 (大于 95%)、氮气和氩气组成, 且比地球大气稀薄约 100 倍<sup>[8]</sup>. 火星上的稀薄大气层对于陨石和微陨石的抵御作用非常微弱, Nealy 等<sup>[9]</sup> 进行的实验证明, 陨石撞击对于火星表面具有破坏性影响, 由于缺乏大气保护, 火星表面微陨石的速度可以达到  $20 \sim 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . 因而, 在建造过程中需采取严格的保护措施以应对大型陨石撞击, 并尽可能地使用耐用且有弹性的建筑材料. 另外, 近真空条件会导致建筑材料中的挥发物大量释放. Kanamori 等<sup>[10]</sup> 研究了将砂浆长期暴露在真空中的情况, 得出真空条件会加速水分流

失的结论.

尽管火星上的温度循环变化不像月面那样剧烈, 其温变范围仍远大于地球. 火星两极附近的平均温度低至  $-125^{\circ}\text{C}$  左右, 而赤道附近的平均温度约为  $20^{\circ}\text{C}$ , 在夜间火星赤道上的温度可下降到约  $-73^{\circ}\text{C}$ <sup>[11]</sup>. 这种较大的昼夜温差对于建筑材料的耐久性能提出了严峻的挑战.

火星还具有相当高的辐射水平, 可达到每年  $100 \text{ mSv}$ <sup>[12]</sup>. 地外空间中主要有 3 种类型的辐射源, 分别是太阳风、银河宇宙射线和太阳宇宙射线, 通常由相距较远的超新星爆炸产生<sup>[13]</sup>. 由于高能粒子的不规则发射, 太阳活动水平不同, 当前根据辐射能量已划分 8 个量级. 辐射产生的粒子不断与火星表面相互作用, 并可能穿透数微米到数几米不等的深度.

1.2 火壤性质

火星风化层, 一般又称作火壤, 是在火星上进行原位建造的丰富建筑材料资源. 虽然目前尚未成功地将火壤样本从火星带回, 但通过 Viking 和 Mariner-9 轨道飞行器进行的遥感操作已证实火壤中存在着大量可用资源 (见图 1<sup>[14]</sup>). 在火星表面还观察到一些含量虽不高但在火星建造中具有一定应用前景的矿物质<sup>[15]</sup>, 例如碳酸镁和无定形二氧化硅物质. 此外, 在探索火星土壤的过程中还发现了玻璃状材料及冲击玻璃材料<sup>[16]</sup>.

火星风化层的密度在  $1000 \sim 1900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  之间,

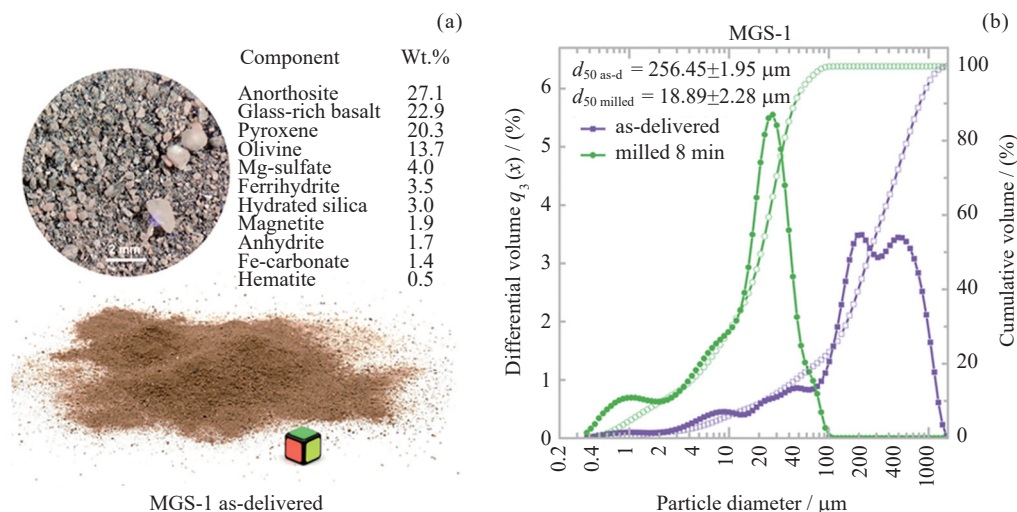


图1 MGS-1 风化层模拟物的特性. (a) 显微镜下图像与 MGS-1 的矿物组成, (b) 研磨后的 MGS-1 粉末的粒度分布  
Fig. 1 Properties of MGS-1 regolith simulant. (a) Microscopic photographs with the composition of MGS-1, (b) particle size distribution of MGS-1

风化层的致密性使得利用松散的风化层覆盖栖息地免受辐射和微陨石撞击成为可能. Ortiz 等<sup>[17]</sup> 在实验中选择使用 1 m 厚的火星风化层, 与火星上的较弱大气层一起可以阻止初级宇宙射线产生的中子的辐射作用.

火星的热学性能较差, 经实验测试, 火壤的平均热导率在  $0.02 \sim 0.105 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  之间, 比热容为  $500 \sim 600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ <sup>[16]</sup>. 这主要是因为低温和大气压下, 晶粒之间较小的物理接触限制了热传导过程, 导致较低的体积导热性. 另外, 较低的热传导性使得火星风化层产生屏蔽作用, 可以作为抵御火星上产生的极端温度波动的屏障<sup>[18]</sup>.

由于空间风化作用的存在, 火壤粒子比地球上的粒子更锋利. 因而风化层可被压制成块状, 从而形成具有良好互锁性能的坚固材料, 这在火星原位建造中将发挥巨大作用<sup>[19]</sup>. 此外, 通过遥感数据可知火星风化层的含水量高达 3 wt%, 且孔隙较多, 风化层较高的孔隙率使得通过熔化、加热或与黏结剂结合处理产生的建筑材料的机械性能得以增强.

## 2 火壤类混凝土材料

火星混凝土的想法最早由 McKay 等<sup>[20]</sup> 于 1996 年提出. 由于火星风化层的成分与水泥十分接近, 在火壤中发现了生产火星水泥所需的材料<sup>[21]</sup>. 因此, 基

于火壤的混凝土材料非常适合作为在火星上进行原位建造的建筑材料, 其不仅易于加工、成型和制造, 而且还具有混凝土自身的良好弹性和整体特性.

### 2.1 含硫混凝土

尽管目前已证实了火星上有水的存在, 但对于水资源的储存和勘探方法还在继续研究中, 因而水对于火星建造而言仍是宝贵的资源<sup>[22-24]</sup>, 目前大多数研究正积极开展利用火壤进行无水混凝土的分析开发, 含硫混凝土即为一种利用硫代替水泥和水作为胶结材料的混凝土.

火星风化层中的 FeS 矿物极其丰富, 火壤中的平均硫含量约为 2.5wt%, 可作为原位提取硫的原材料<sup>[25]</sup>. Wan 等<sup>[26]</sup> 将硫在约  $120 \sim 150 \text{ °C}$  的温度下加热和熔化使其转变成液态硫 ( $S_a$ ), 之后将融化的硫与火壤混合, 待其冷却后硫凝固转化为稳定的斜方晶型 ( $S_\beta$ ) 与火壤骨料黏结从而制备出含硫混凝土材料<sup>[27]</sup>. Wan 等<sup>[28]</sup> 将不同含量的硫 (40%~60%) 与火壤模拟物 (Mars-1 A) 混合, 结果表明硫与火壤模拟物的比例为 1:1 时机械性能最优. 此外, Toutanji 和 Grugel<sup>[29]</sup> 发现玻璃纤维的加入可以使含硫混凝土的强度最大提高约 45%.

此外, 含硫混凝土可在更短的时间内达到与普通硅酸盐混凝土相同的抗压强度、弯曲强度和弹性模量<sup>[30]</sup>, 同时含硫混凝土还具有较低的孔隙率和较高的

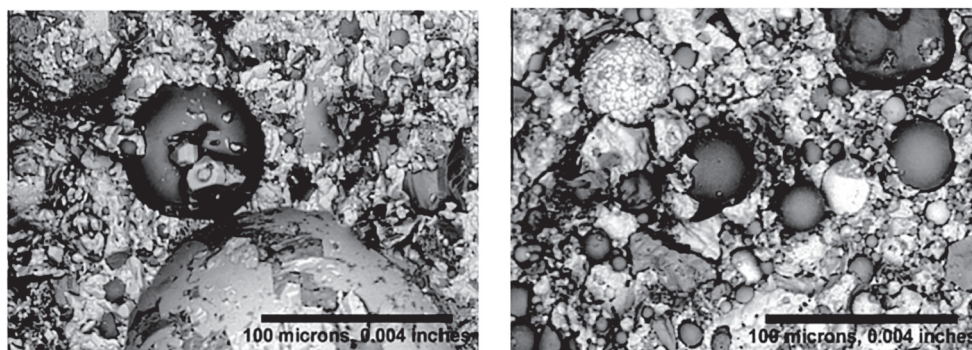


图 2 经温度循环后的断面 SEM

Fig. 2 SEM view of the section after temperature cycle

抗冻性. 与金属或合金的生产不同, 含硫混凝土的制造在低于 150 °C 的温度下进行, 并且其生产过程中不需要额外的材料和还原剂 (如碳或镁材料) 推进反应或电解熔融体<sup>[25]</sup>.

然而火星环境的冻融循环过程会降低含硫混凝土的抗压强度. 同时, 由于硫在冷却收缩后会在含硫混凝土中产生裂缝, 导致硬化的硫从骨料中脱黏 (见图 2<sup>[27]</sup>), 从而对含硫混凝土的整体性产生不利影响.

另外, 火星的真空和高温环境会导致硫的升华和质量损失从而降低含硫混凝土的耐久性. Grugel 和 Toutanji<sup>[30]</sup> 的研究结果表明, 暴露在真空环境 58 天后, 含硫混凝土的质量仅损失了初始质量的 30% 左右 (见图 3<sup>[30]</sup>).

## 2.2 聚合物混凝土

除含硫混凝土外, 有研究提出采用聚合物代替水泥浆和水, 以黏合骨料和细粉. 聚合物混凝土的一般制备方法是有机单体掺入混凝土中, 采用加热 (或暴露在紫外线下) 或加压的方法使聚合物熔化并和骨料或填料结合<sup>[31]</sup>. 一般骨料和填料占聚合物混凝土体积的 75%~80% 以上, 其余 20%~25% 填充有聚合物黏合剂, 这些聚合物黏合剂可使用不饱和聚酯、甲基丙烯酸甲酯、环氧树脂、聚氨酯和脲醛树脂等<sup>[32]</sup>.

同含硫混凝土一样, 制备聚合物混凝土不需要水, 且聚合物混凝土在室温下固化一天后可达到其强度的 70%~75%, 而普通混凝土仅为 10%~20%. 聚合物的含量是影响聚合物混凝土性能的关键因素, 增加聚合物含量可以更好地填充骨料和基体之间的空隙, 从而达到改善聚合物混凝土的耐久性和强度性能的目的<sup>[32]</sup>. 以环氧聚合物混凝土为例, Elalaoui Ous-

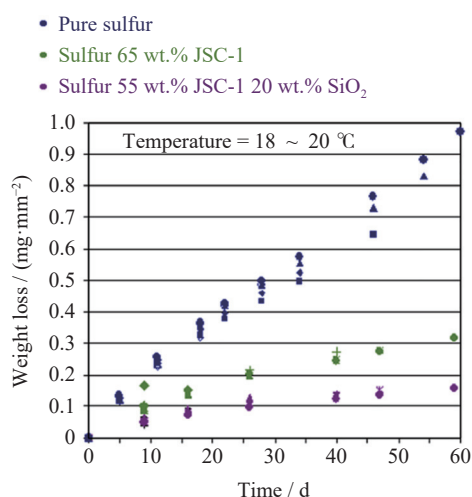


图 3 暴露于真空下硫的重量损失

Fig. 3 Weight loss diagram of sulfur exposed to vacuum

sama 等<sup>[32]</sup> 研究了环氧树脂含量对环氧聚合物混凝土机械性能的影响 (见图 4a<sup>[32]</sup>), 结果表明环氧聚合物混凝土的强度随着聚合物含量的增加而增强. 当环氧树脂含量从 13% 增加到 16% 时, 强度的增加将受到限制. 此外, 关于通过添加各类型纤维 (如钢纤维、玻璃纤维、碳纤维和聚酯纤维) 来加固聚合物混凝土已进行了大量实验 (见图 4b<sup>[33]</sup>). 与普通硅酸盐混凝土相比, 聚合物混凝土的抗压强度提高约 2~4 倍, 抗拉强度提高约 3~6 倍.

同时, 在火星原位建造的应用中, 聚合物混凝土也存在其自身的缺陷. 例如聚合物对蠕变效应和温度变化较为敏感<sup>[34]</sup>, 特别是在接近其玻璃温度以及选用环氧树脂聚合物时 (环氧混凝土比聚酯混凝土对温度

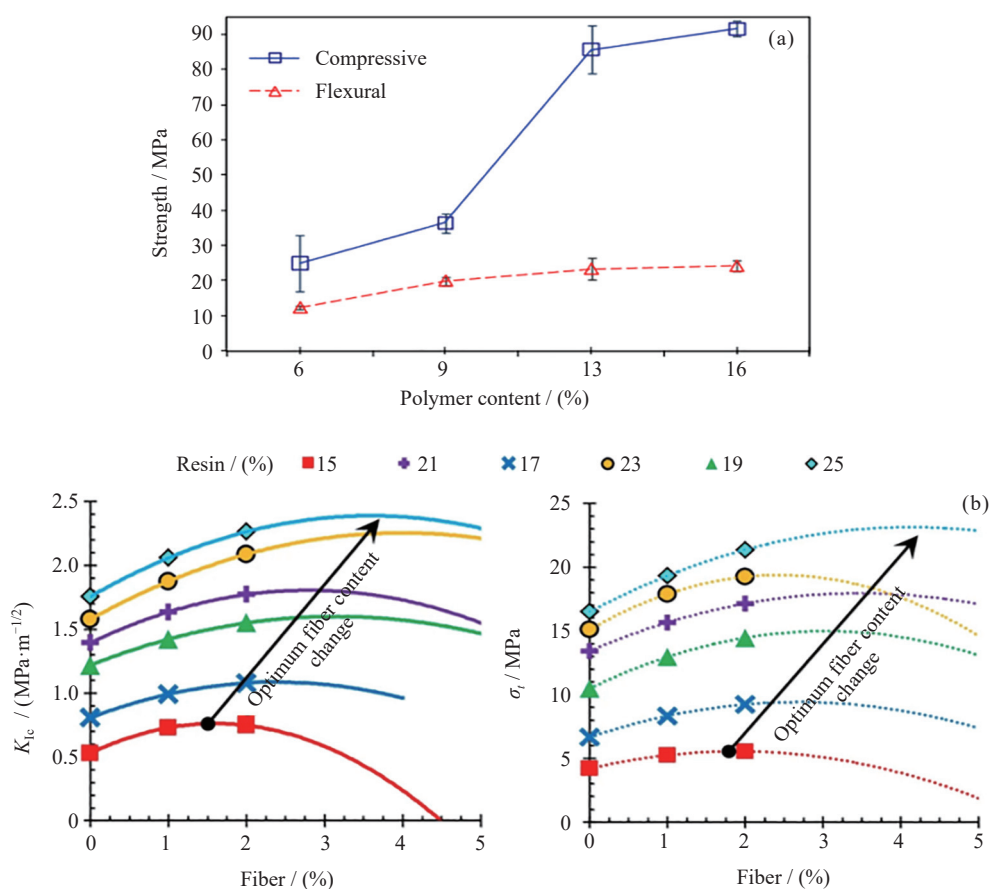


图4 聚合物含量和添加纤维对地聚合物混凝土性能的影响。(a) 聚合物含量对环氧聚合物混凝土抗压强度和抗弯强度的影响, (b) 断裂韧性和抗拉强度由于在不同树脂含量中添加纤维引起的变化, 以及树脂含量变化引起的最佳纤维含量变化趋势

Fig. 4 Effect of polymer content and added fiber on properties of geopolymer concrete. (a) Effect of polymer content on the compressive and flexural strength of epoxy polymer concretes, (b) changes in fracture toughness and tensile strength due to the addition of fibers to the resin content, and trends in optimal fiber content due to changes in resin content

的升高更敏感). 骨料和黏合剂 (即聚合物) 之间的脱黏、专门设计所需要的聚合物的较高成本和特殊加工需求都使得聚合物混凝土在火星上的应用受到了限制<sup>[35]</sup>.

### 2.3 地聚合物混凝土

地聚合物通常指碱与铝、硅或一些工业副产品材料 (例如炉渣、粉煤灰等) 反应形成的具有胶结性能且耐火的无机聚合物材料<sup>[36]</sup>. 由于火壤中的硅氧化物和氧化铝含量较多, 提取硅、铝单体较为简单, 其可与碱性活化剂反应生产地质聚合物胶凝材料<sup>[37]</sup>.

利用地聚合物生产的混凝土在机械性能和耐热性方面均优于传统的硅酸盐混凝土<sup>[38]</sup>. 地聚合物混凝

土的性能特征高度依赖于混凝土混合料中硅与铝的比率, 当硅与铝比率 $\geq 2$ 时可使地聚合物混凝土形成更平整的微观结构, 并改进其机械性能<sup>[39]</sup>. Montes等<sup>[40]</sup>通过实验表明地聚合物混凝土可达到16.6~33.1 MPa的抗压强度, 使得其在火星上建造基础设施是可行的. 另一方面, 地聚合物具有较高的熔点<sup>[41]</sup>, 可在800℃下保持稳定, 并且可以抵抗火星环境中的高低温循环, 在真空条件下也具有稳定性<sup>[42]</sup>. 此外, Montes等<sup>[40]</sup>还提出地聚合物材料是良好的辐射屏蔽材料, 可长时间地为建筑提供足够强的辐射防护.

为最大限度地减少水的使用, Wang<sup>[42]</sup>提出了水循环装置设想, 如图5(a)所示<sup>[42]</sup>: 将制备的地聚合物

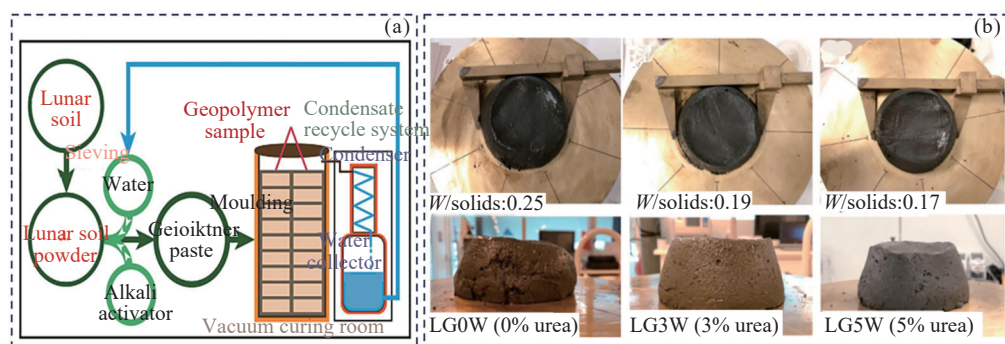


图 5 减少地聚合物混凝土制备用水量的两种措施. (a) 制备地质聚合物的样品和假设的水循环装置工艺流程, (b) 地质聚合物的流动性的小型坍落度测量

Fig. 5 Two measures to reduce water consumption in preparation of geopolymer concrete. (a) Process flow chart for the preparation of a geopolymer sample and a hypothetical water-recycling device, (b) mini slump measurements of the flowability of the geopolymers

混凝土放入真空固化室中, 然后通过冷凝回收系统收集和再利用蒸发的水, 以减少水的浪费和节约建筑材料成本. 此外, Pilehvar 等<sup>[43]</sup>提出使用尿素作为高效减水剂尽管会降低地聚合物混凝土样品的黏度和屈服应力, 但其可使原料的水固比由 0.25 降低到 0.17 (见图 5b<sup>[43]</sup>).

然而地聚合物混凝土在火星环境中的应用仍存在以下限制: 制备地聚合物的碱活化剂目前无法原位生产, 运输费用大. 尽管大气稀薄, 火星大气中存在大量的二氧化碳, 可能导致地聚合物混凝土碳化从而使得其强度降低<sup>[44]</sup>. 碳化后的地聚合物混凝土的抗压强度虽低于普通混凝土, 但仍高于其他建筑材料, 例如抗压强度为 3.5 MPa 的普通黏土砖<sup>[45]</sup>. 因而, 地聚合物混凝土作为火星建造材料的可行性有待进一步研究考证.

## 2.4 水凝胶基混凝土

水凝胶指微/纳米结构中保持高含水量的一类交联聚合物. 当用作火星混凝土黏合剂时, 可以有效与火星表面的水原位结合从而最大限度地减少从地球运输材料的成本<sup>[46]</sup>. 此外, 由于一些聚合物的交联可在室温下自发发生而不需要提供额外的能量输入, 相较于其他材料 (例如普通硅酸盐水泥和含硫混凝土), 水凝胶基混凝土不需要大型复杂的供能设施, 且不需要消耗大量能源.

水凝胶基混凝土的制备过程较为简单, 首先, 将干凝胶粉溶解到温水中以形成溶胶; 然后, 将溶胶与骨料混合以形成均匀的混合物, 当溶胶干燥为凝胶状

态时, 水凝胶基混凝土 (HBC) 即可固化硬化达到强度要求<sup>[47]</sup>. Liu 等<sup>[48]</sup>在不同条件下 (空气干燥 AD、冷冻 F、冷冻干燥 FD) 固化制备了 HBC, 并对其机械性能进行研究以测试在火星上原位生产 HBC 的可能性 (见图 6<sup>[48]</sup>).

在不同的固化条件下, HBC 的弹性模量和抗压强度均随着溶胶/骨料 ( $s/a$ ) 比的增加而增加, 在达到临界值 (0.1~0.2) 后随着  $s/a$  比的进一步增加而降低. 冷冻固化的 HBC ( $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和冷冻干燥固化的 HBC ( $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 10 Pa) 其弹性模量和抗压强度均低于常温常压干燥的 HBC. 尽管强度略微降低, 前两类 HBC 材料可满足在普通火星载荷下建造建筑的强度要求. 水凝胶基混凝土作为建筑材料建造火星基地的可行性已通过计算模拟证实, 控制基地结构变形的弹性模量是后续制备具有更优性能 HBC 的主要目标<sup>[49]</sup>.

## 3 火壤熔融和烧结原位固化材料

熔融工艺指加热火星风化层或矿物矿石到熔点以上, 使得其从固态转变为液态, 然后将熔体浇铸到模具中冷却以制造新的固体结构部件.

将多孔材料 (通常以粉末形式) 加热至低于其熔点的温度称为烧结<sup>[50]</sup>, 一般在进行烧结工艺前先将火壤固结 (压实) 成所需形状的结构部件, 以减少空隙并限制收缩, 从而减少了烧结所需的能量和持续时间. 然后加热已压实的风化层, 直到产生致密的构件<sup>[51]</sup>. 通过烧结使得颗粒结合, 同时孔隙率降低最终形成所需固体, 烧结原理如图 7 所<sup>[52]</sup>.

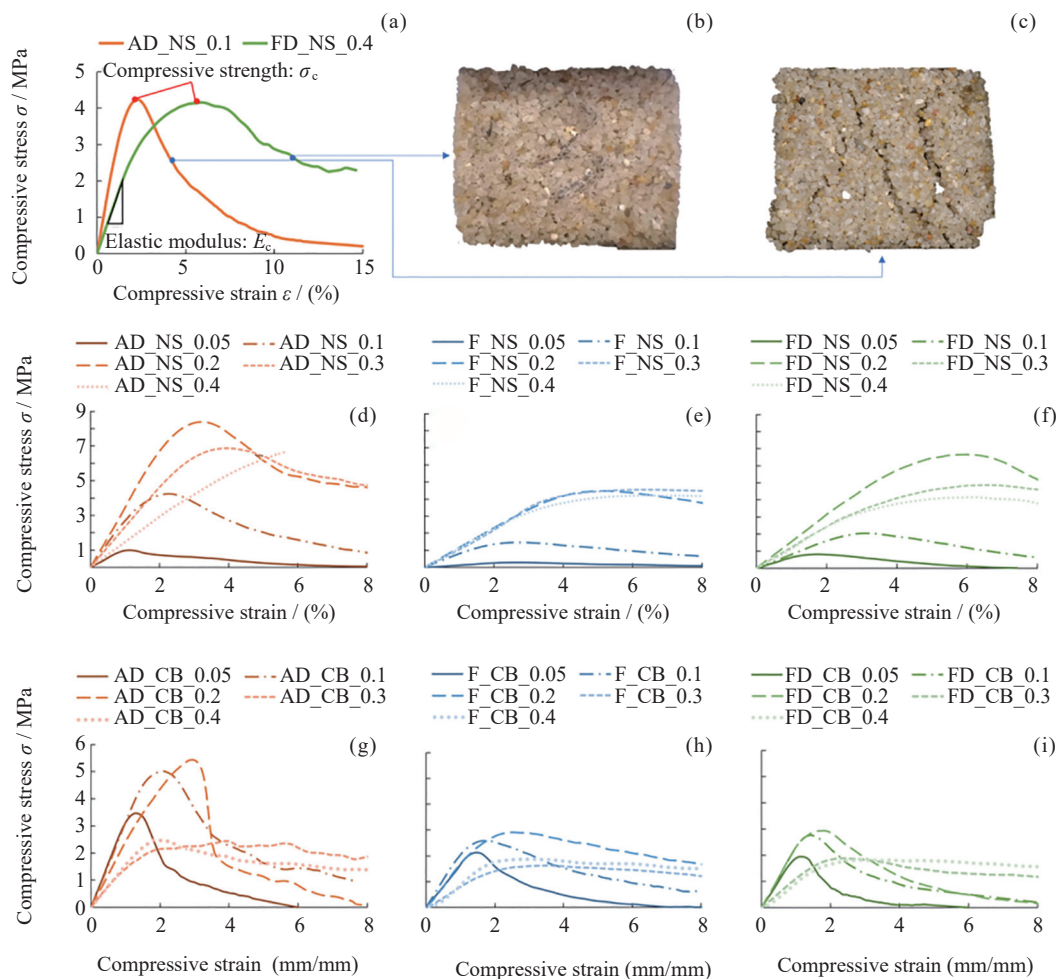


图6 HBC的机械性能测试. (a) 立方体的典型压应力与应变曲线, (b)(c) 立方体的破坏模式. 以天然砂(NS)为基础的HBC的应力应变曲线: (d) 风干固化, (e) 冷冻固化, (f) 冷冻干燥固化. 以陶瓷(CB)为基础的HBC的应力应变曲线: (g) 风干固化, (h) 冷冻固化, (i) 冷冻干燥固化

Fig. 6 Mechanical properties test of HBC. (a) Typical compressive stress *vs.* strain curves of the cube, (b)(c) failure mode of the cube. Compressive stress *vs.* strain curve of Natural Sand (NS)-based HBC: (d) Air Drying (AD)-cured, (e) Freezing (F)-cured, (f) Freeze-Drying (FD)-cured. Compressive stress *vs.* strain curve of the Ceramic Bead (CB)-based HBC: (g) Air Drying (AD)-cured, (h) Freezing (F)-cured, (i) Freeze-Drying (FD)-cured

通过熔融和烧结工艺可利用火壤制造多种矿石(例如铸造玄武岩)、玻璃、纤维等建筑材料. 此外, 直接烧结压实后的火壤可得到具有足够强度的块体材料, 而对火壤中丰富的黏土资源进行烧结还可以生产陶瓷材料. 上述材料在火星原位建造过程中均可发挥不同的作用, 本节将对熔融和烧结类原位固化材料进行介绍.

### 3.1 熔融火壤材料

对火壤进行加热的过程中最先熔融的成分为玻璃相玄武岩, 继续加热可得到熔融铁矿石和斜长石

等, 冷却成型后即可制造出所需的固体材料. McSween等<sup>[53]</sup>认为, 与太阳系中其他行星相比, 火星的玄武岩含量最高, 且存在于整个火星表面. 玄武岩是一种火成岩, 通常在熔岩流中由岩浆挤压形成, 由约52%的 $\text{SiO}_2$ 和一些其他气体组成. 玄武岩具有良好的抗辐射特性, 还具有较高的比热容和较低的渗透常数<sup>[54]</sup>. 上述特性使得其更加适合用作火星原位建造材料, 熔融后冷却得到的玄武岩一般称作铸造玄武岩<sup>[55]</sup>.

铸造玄武岩是一种黑色、无定形且均匀的具有玻璃状特征的固体材料<sup>[56]</sup>. 在火星建造中, 铸造玄武岩

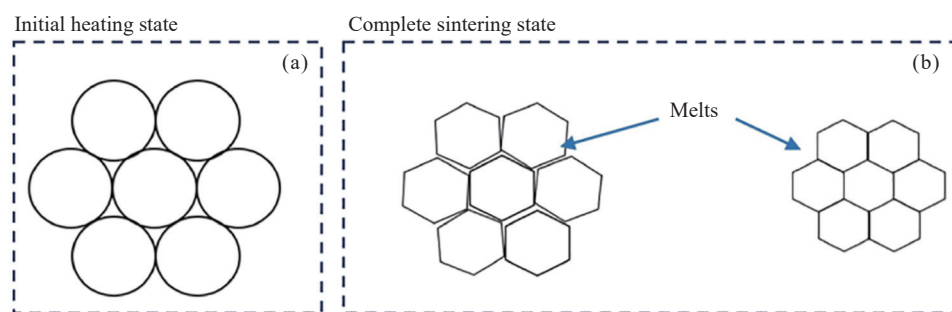


图7 烧结原理

Fig. 7 Sintering process diagram

可以模制成砖或板状结构构件(例如板), 熔融铸造玄武岩也可用于将结构构件焊接或连接起来, 此外还可以利用铸造玄武岩进行原位特征的修复<sup>[56]</sup>. 铸造玄武岩具有很高的抗压强度与拉伸强度比(近似于1:15), 其抗压强度和抗拉强度都高于普通硅酸盐混凝土<sup>[57]</sup>.

如图8所示<sup>[58]</sup>, Allen等<sup>[58]</sup>进行了30次熔融玄武岩的实验, 以探究加热温度和加热时间对其强度的影响. 结果表明, 玄武岩的抗压强度受峰值温度影响较大, 而时间对其强度影响非常小. 因而, 快速在火星上制造建筑构件可采用熔融烧结方法.

虽然熔融工艺操作较为简单, 但铸造玄武岩的生产一般需要达到其熔点附近的加热温度, 对于能源的消耗较大. 而铸造玄武岩较高的导热性和冷却过程中产生的收缩变形, 均可能产生热裂纹. 此外, 铸造玄武岩的硬度很高, 使得随后的加工(例如切割和钻孔)过程很难进行<sup>[59]</sup>. 因此, 对于铸造玄武岩的制造/加工需要非常谨慎和精确的操作.

进一步分析, 通过铸造获得的材料(例如玄武岩)经加工后还可以生产玻璃、纤维等材料, 主要取决于冷却后的结晶程度和速度.

烧结熔融的风化层若迅速冷却, 将转变成玻璃材料<sup>[60]</sup>. 如图9(a)所示, 通常玻璃制造可分为3个步骤: 进行原料(玄武岩砂)熔化、热玻璃成型、对其进行退火和冷却处理以避免开裂<sup>[61]</sup>. 此外, 玻璃的性能很大程度上仅取决于玄武岩砂的成分, 通过铸造玄武岩加工而成的玻璃材料强度可达到约3.4 GPa<sup>[62]</sup>.

纤维材料也可从温度为1250~1375℃的熔融玄武岩中提取<sup>[63]</sup>. 如图9(b)所示<sup>[64]</sup>, 在连续纤维生产中熔体通过带有多个小孔的铂衬套. 在孔板下面, 纤维通过喷水冷却, 并涂上一层薄薄的浆料, 以防止机械损伤和水解削弱, 这两者都会大大降低纤维材料的强

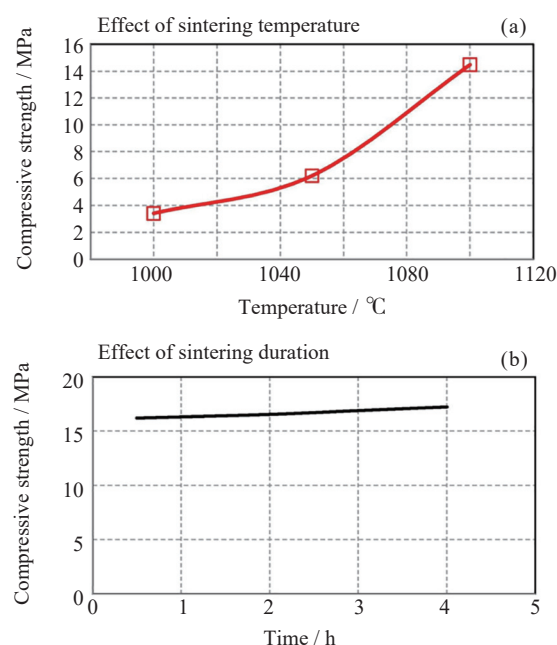


图8 熔融玄武岩强度测试结果

Fig. 8 Strength test results of molten basalt

度. 然后将单根纤维拉在一起制成粗纱. 纤维的直径可以通过改变熔体温度和缠绕速度来控制. Tucker等<sup>[64]</sup>提出在生产过程中可添加8wt%的氧化硼进行连续的纤维制造.

### 3.2 直接烧结火壤材料

由于烧结通常在低于材料熔点的温度下实现, 直接对火壤进行烧结在生产建筑材料方面比熔融工艺所需要的能量输入更少且烧结时间相对较短. Grossman等<sup>[65]</sup>烧结了具有简单形状和不同粒度分布的火星MGS-1模拟粉末, 将不同颗粒组分的粉末压块在1150℃和1200℃下烧结30 min, 得到其抗压强度约为27~77 MPa, 孔隙率为0.5%~13.8% (图10<sup>[65]</sup>).

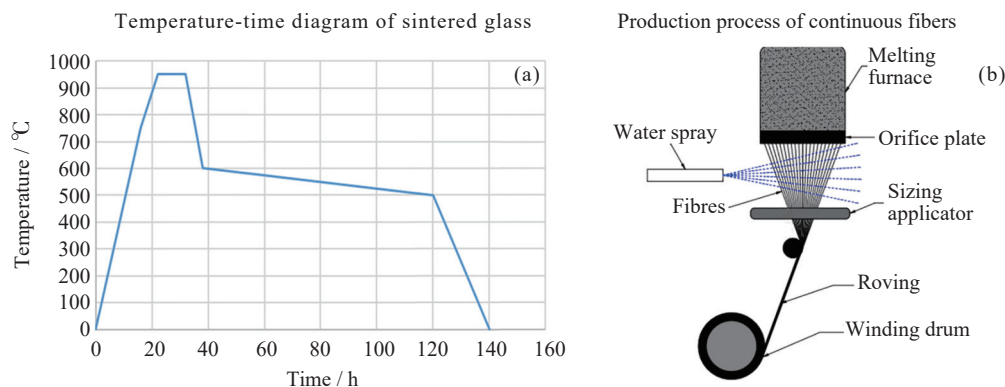


图9 烧结玻璃和连续纤维的生产

Fig. 9 Production of sintered glass and continuous fibers

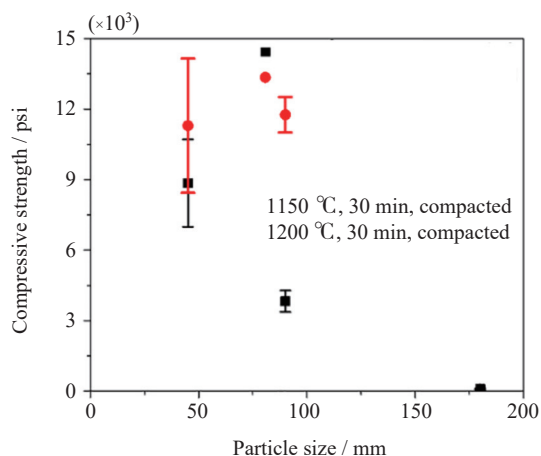


图10 MGS-1样品的抗压强度

Fig. 10 Compressive strength of MGS-1 samples

另外, 已有研究发现火星表面拥有丰富的黏土沉积物, 通过对火星地形的轨道调查已发现了各种各样的黏土矿物, 并且其广泛分布在火星全球<sup>[66]</sup>. 沉积黏土矿物组合有铁/镁蒙脱石、高岭石和硫酸盐、碳酸盐和氯化物盐等, 通过烧结火壤中的黏土可得到建造过程中常用的陶瓷材料<sup>[67]</sup>. 目前, 许多研究已探索了在火星上使用黏土作为建筑材料的可行. 例如 Karl 等<sup>[68]</sup>提出了火星风化层模拟物的湿法处理与辐射炉烧结相结合的新工艺. 以 JSC-Mars-1 A (含有 5wt% 蒙脱石黏土) 为原材料, 通过制备浆料、滑动铸造以及在 1000°C 和 1130°C 下烧结胚体 3 个步骤, 得到了具有优异机械性能的多孔陶瓷材料.

但在火星上进行实际烧结的过程中, 烧结气氛、

烧结温度、粉末成分以及粉末粒度分布均对烧结得到的材料质量有较大影响<sup>[69]</sup>. 此外, 火壤颗粒的不规则形态也会对烧结过程产生不利影响. 在高温真空烧结过程中仍存在许多未知的问题, 如熔点的变化、液相在早期出现、固相的蒸发等.

基于上述问题, 烧结效果亦可通过添加剂或黏合剂来提高, 例如 Karacasulu 等<sup>[70]</sup>提出了一种更可控的烧结技术——冷烧结工艺 (CSP). CSP 工艺通过在低温 (低于 250°C 左右) 下利用 NaOH 溶液作为液体介质生产致密固体 (例如玻璃、纤维、复合材料等) 的技术, 无需在高温下进行烧结, 不需要特定的高温炉设备, 并且冷烧结工艺通常仅通过外部施加的压力进行辅助, 即只需使用普通压力机而非大型加压设备. 与传统的高温烧结技术相比, CSP 的能源需求相对较低, 操作简单且设备要求低<sup>[71]</sup>. 图 11<sup>[70]</sup>即为采用 CSP 工艺烧结火壤模拟物的强度测试实验. 结果表明, 随着液相浓度 (从 3 mol 增加到 10 mol) 和加工温度 (从 150°C 增加到 250°C) 的升高, 压坯的相对密度和冷破碎强度值在 30 min 内得到提高. 使用 43 mol NaOH 溶液在 88°C 下烧结得到最高强度 (10 MPa).

为综合比较上述几类火壤类材料, 表 2 汇总了以火壤为主要原料的混凝土材料和熔融/烧结原位固化材料的制备条件与原位利用率. 混凝土类材料的制备过程相对于熔融/烧结类材料所需的能量显著更低, 但熔融/烧结类材料的原位利用率较理想, 可达到 100%, 这对于火星上缺乏可利用资源的问题具有重要意义.

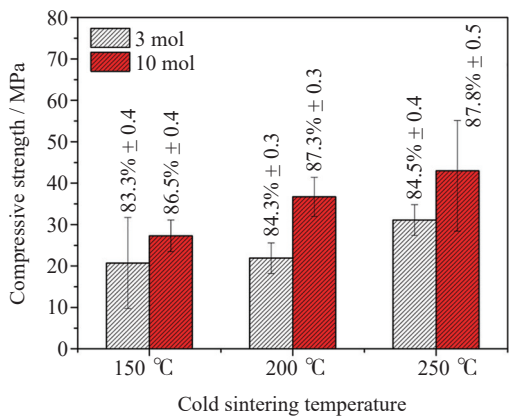


图 11 使用具有不同浓度的 NaOH 溶液在不同加工温度下生产的冷烧结 MGS-10 风化层压坯的冷破碎强度  
Fig. 11 Cold crushing strength of cold sintered MGS-10 regolith samples produced at different processing temperatures with different concentrations of NaOH solution

表 2 制备以火壤为原料的不同建材的比较  
Table 2 Comparison of different building materials prepared based on Mars regolith

| 建材类型    | 制备温度条件/℃                 | 原位利用率/(%) | 文献      |
|---------|--------------------------|-----------|---------|
| 混凝土类材料  |                          |           |         |
| 含硫混凝土   | 120~150                  | 50~80     | [28,72] |
| 聚合物混凝土  | 200~300                  | 90        | [73]    |
| 地聚合物混凝土 | 20~80                    | 70        | [45,74] |
| 水凝胶基混凝土 | 20                       | 70~90     | [48,75] |
| 熔融类火壤材料 | 1000~1300                | 100       | [58,59] |
| 烧结类火壤材料 | 900~1300<br>(冷烧结150~250) | 100       | [65,70] |

4 结论与展望

目前,火壤类混凝土材料和火壤熔融与烧结原位固化材料的研究不断深入,火星原位建造材料的研究正处于快速发展阶段,但仍存在以下局限性.

(1) 尚未有研究提出成功从火壤中获取用于生产聚合物混凝土的聚合物原材料的方法,尽管这类混凝土的强度高于普通混凝土,原材料的缺乏使得聚合物混凝土在火星建造中的应用受到很大程度的限制.

(2) 火壤熔融和烧结原位固化材料的生产过程消耗能量量大,且需要提供施加压力的辅助设备以密实材料等.

(3) 火星原位建造材料在火星极端环境下的服役

性能有待提高.特别是在火星的真空环境和较大的温度波动条件下,混凝土类材料的耐久性和机械强度均受到了影响.因此,在实际火星建造中须考虑如何提高极端环境下材料耐久性等.

针对火星原位建造材料目前面临的诸多局限性与挑战,在未来可以围绕以下方面开展进一步研究.

(1) 加强无水混凝土和原位制备混凝土黏结剂的研究.尽管火星上探测到了水的存在,但研制无水混凝土在火星建造中仍具有重要意义.另一方面,若黏结剂可以大量从风化层中获取,生产火壤类混凝土的成本将大大降低.

(2) 优化熔融和烧结工作流程和方法以提高能量利用率,并减小设备规模.可以选择性地对火壤进行预处理步骤或通过改进烧结方法来降低对能源的需求,同时可通过工艺流程的再设计降低对于烧结辅助设备的功能需求(如功率、加压大小等).

(3) 加强火星原位建造材料在极端环境的服役性能研究.在模拟的火星环境下进一步研究材料的机械性能(如耐久性)等,积极开发新的环境适应型材料,并通过改进生产制备过程来弥补材料自身的性能缺陷.

参考文献

[1] MUSK E. Making life multi-planetary[J]. *New Space*, 2018, 6(1): 2-11

[2] ZHENG W, HSU H, ZHONG M, et al. China's first-phase Mars exploration program: Yinghuo-1 orbiter[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 86: 155-159

[3] VADIM Z, VLADIMIR P. Russian nuclear rocket engine design for mars exploration[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2007, 12(3): 256-260

[4] SCOTT A N, OZE C. Constructing mars: concrete and energy production from serpentinization products[J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(8): 364-370

[5] BENAROYA H. Lunar habitats: a brief overview of issues and concepts[J]. *REACH*, 2017, 7-8: 14-33

[6] CUCINOTTA F A, HU S W, SCHWADRON N A, et al. Space radiation risk limits and Earth-Moon-Mars environmental models[J]. *Space Weather*, 2010, 8(12): S00E09

[7] OBERST J, NAKAMURA Y. A seismic risk for the lunar base[C]//Proceedings of the 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Houston: NASA, 1992

[8] SEOL M L, HAN J W, MOON D I, et al. Triboelectric nanogenerator for Mars environment[J]. *Nano Energy*,

- 2017, **39**: 238-244
- [9] NEALY J E, WILSON J W, TOWNSEND L W. Solar-flare Shielding with Regolith at A Lunar-base site[R]. Hampton: NASA, 1988
- [10] KANAMORI H, MATSUMOTO S, ISHIKAWA N. Long-term properties of mortar exposed to a vacuum[J]. *ACI Special Publication*, 1991, **125**: 57-70
- [11] SCHEERBAUM G. In-Situ manufacture of martian construction materials[M]//Space and Robotics 2000. Reston: American Society of Civil Engineers, 2000: 934-940
- [12] ZUBRIN R. The Mars direct plan[J]. *Scientific American*, 2000, **282**(3): 52-55
- [13] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar Engineering of Thermal Processes[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. , 2013
- [14] KHOSHNEVIS B, CARLSON A, THANGAVELU M. IS-RU-based Robotic Construction Technologies for Lunar and Martian Infrastructures[R]. Los Angeles: NASA, 2017
- [15] SCOTT A, OZE C, HUGHES M W, *et al.* Performance of a magnesia silica cement for Martian construction [M]//MALLA R B, GOLDBERG R K, ROBERTS A D. Earth and Space 2018: Engineering for Extreme Environments. Reston: American Society of Civil Engineers, 2018: 629-636
- [16] CANNON K M, MUSTARD J F. Preserved glass-rich impactites on Mars[J]. *Geology*, 2015, **43**(7): 635-638
- [17] ORTIZ A R, RYGAŁOV V Y, DE LEÓN P. Radiation protection strategy development for mars surface exploration[C]//Proceedings of the 45th International Conference on Environmental Systems. Bellevue: ICES, 2015
- [18] ZENT A P, HECHT M H, COBOS D R, *et al.* Thermal and electrical conductivity probe (TECP) for phoenix[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, **114**(E3): E00A27
- [19] TAYLOR L A, MEEK T T. Microwave sintering of lunar soil: properties, theory, and practice[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2005, **18**(3): 188-196
- [20] MCKAY D S, ALLEN C C. Concrete—a practical construction material for Mars[M]//Engineering, Construction, and Operations in Space V. Reston: American Society of Civil Engineers, 1996: 566-570
- [21] CLIFTON E W. Design and construction for a permanent presence on Mars[C]//Proceedings of the Fifth Case for Mars Conference. Boulder: the University of Colorado. 2000
- [22] MELLEROWICZ B, ZACNY K, PALMOWSKI J, *et al.* RedWater: water mining system for Mars[J]. *New Space*, 2022, **10**(2): 166-186
- [23] VAKKADA RAMACHANDRAN A, ZORZANO M P, MARTIN-TORRES J. Experimental investigation of the atmosphere-regolith water cycle on present-day Mars[J]. *Sensors*, 2021, **21**(21): 7421
- [24] PIQUEUX S, BUZ J, EDWARDS C S, *et al.* Widespread shallow water ice on Mars at high latitudes and mid-latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(24): 14290-14298
- [25] BARKATT A, OKUTSU M. Obtaining elemental sulfur for Martian sulfur concrete[J]. *Journal of Chemical Research*, 2022. DOI: [10.1177/17475198221080729](https://doi.org/10.1177/17475198221080729)
- [26] WAN L. Experimental and Computational Analysis of the Behavior of Ultra High Performance Concrete, Prestressed Concrete, and Waterless Martian Concrete at Early Age and Beyond[D]. Evanston: Northwestern University, 2015
- [27] TOUTANJI H, GLENN-LOPER B, SCHRAYSHUEN B. Strength and durability performance of waterless lunar concrete[C]//Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2005
- [28] WAN L, WENDNER R, CUSATIS G. A novel material for in situ construction on Mars: experiments and numerical simulations[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, **120**: 222-231
- [29] TOUTANJI H A, GRUGEL R N. Performance of “waterless concrete”[M]//Concrete Solutions. London: CRC Press, 2009: 229-232
- [30] GRUGEL R N, TOUTANJI H. Sulfur “concrete” for lunar applications – Sublimation concerns[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(1): 103-112
- [31] MANI P, GUPTA A K, KRISHNAMOORTHY S. Comparative study of epoxy and polyester resin-based polymer concretes[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1987, **7**(3): 157-163
- [32] OUSSAMA E, ELHEM G, VALÉRIE M, *et al.* Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250°C[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, **27**(1): 415-424
- [33] BEDI R, CHANDRA R, SINGH S P. Mechanical properties of polymer concrete[J]. *Journal of Composites*, 2013, **2013**: 948745
- [34] BISBY L A, GREEN M F, KODUR V K R. Response to fire of concrete structures that incorporate FRP[J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2005, **7**(3): 136-149
- [35] TAVARES C M L, RIBEIRO M C S, FERREIRA A J M, *et al.* Creep behaviour of FRP-reinforced polymer concrete [J]. *Composite Structures*, 2002, **57**(1/2/3/4): 47-51
- [36] PROVIS J L, VAN DEVENTER J S J. Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009
- [37] RANGAN B V. Geopolymer concrete for environmental protection[J]. *The Indian Concrete Journal*, 2014, **88**(4): 41-59
- [38] SANKAR K, STYNOSKI P, AL-CHAAR G K, *et al.* Sodi-

- um silicate activated slag-fly ash binders: Part I – Processing, microstructure, and mechanical properties[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, **101**(6): 2228-2244
- [39] THOKCHOM S, MANDAL K K, GHOSH S. Effect of Si/Al ratio on performance of fly ash geopolymers at elevated temperature[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2012, **37**(4): 977-989
- [40] MONTES C, BROUSSARD K, GONGRE M, *et al.* Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications [J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(6): 1212-1221
- [41] NEVES J M, RAMANATHAN S, SURANENI P, *et al.* Characterization, mechanical properties, and microstructural development of lunar regolith simulant-portland cement blended mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **258**: 120315
- [42] WANG K T, TANG Q, CUI X M, *et al.* Development of near-zero water consumption cement materials via the geopolymerization of tektites and its implication for lunar construction[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 29659
- [43] PILEHVAR S, ARNHOF M, ERICHSEN A, *et al.* Investigation of severe lunar environmental conditions on the physical and mechanical properties of lunar regolith geopolymers[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, **11**: 1506-1516
- [44] BERNAL S A, MEJÍA DE GUTIÉRREZ R, PROVIS J L. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, **33**: 99-108
- [45] ALEXIADIS A, ALBERINI F, MEYER M E. Geopolymers from lunar and Martian soil simulants[J]. *Advances in Space Research*, 2017, **59**(1): 490-495
- [46] BOYNTON W V, FELDMAN W C, SQUYRES S W, *et al.* Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: evidence for subsurface ice deposits[J]. *Science*, 2002, **297**(5578): 81-85
- [47] LIU N, QIU J S. Xerogel-based building material (XBM): potential for construction on Mars base and other resourceless sites[C]//Proceedings of SPIE 12044, Behavior and mechanics of multifunctional materials. Long Beach: SPIE, 2022: 120440B
- [48] LIU N, QIU J S. Effect of the freezing temperature and near-vacuum air pressure of Mars on the mechanical properties and microstructure of hydrogel-based concrete (HBC)[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2022, **56**: 101864
- [49] QIU J S, ARTIER J, COOK S, *et al.* Engineering living building materials for enhanced bacterial viability and mechanical properties[J]. *Iscience*, 2021, **24**(2): 102083
- [50] SIMONDS C H. Hot pressing of lunar soil and qualification for manned applications[C]//Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21<sup>st</sup> Century. Houston: NASA, 1988
- [51] PLETKA B J. Processing of lunar basalt materials[M]//LEWIS J S, MATTHEWS M S, GUERRIERI M L. Resources of Near-Earth Space. London: The University of Arizona Press, 1993: 325
- [52] SRIVASTAVA V, LIM S, ANAND M. Microwave processing of lunar soil for supporting longer-term surface exploration on the Moon[J]. *Space Policy*, 2016, **37**: 92-96
- [53] MCSWEEN H Y JR, TAYLOR G J, WYATT M B. Elemental composition of the martian crust[J]. *Science*, 2009, **324**(5928): 736-739
- [54] KADING B, STRAUB J. Utilizing *in-situ* resources and 3D printing structures for a manned Mars mission[J]. *Acta Astronautica*, 2015, **107**: 317-326
- [55] HAPPEL J A. Indigenous materials for lunar construction[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1993, **46**(6): 313-325
- [56] BINDER A B, CULP M A, TOUPS L D. Lunar derived construction materials: cast basalt[C]//Proceedings of Engineering, Construction, and Operations in Space II. Albuquerque: ASCE, 1990
- [57] ROGERS W P, STURE S. Indigenous lunar construction materials[C]//Proceedings of Center for Space Construction Third Annual Symposium. Boulder, Colo: Space Construction Activities, 1991
- [58] ALLEN C C, HINES J A, MCKAY D S, *et al.* Sintering of lunar glass and basalt[C]//Proceedings of the 3rd International Conference. Denver: American Society of Civil Engineers, 1992: 1209-1218
- [59] AULESA V. Architecture of lunar habitats[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Exploration and Utilisation of the Moon. Noordwijk: ESTEC, 2000
- [60] SOBOLEV A V, DMITRIEV L V, BARSUKOV V L, *et al.* The formation conditions of the high-magnesium olivines from the monomineralic fraction of Luna 24 regolith [C]//Proceedings of the 11th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 1980
- [61] SCHLEPPI J, GIBBONS J, GROETSCH A, *et al.* Manufacture of glass and mirrors from lunar regolith simulant[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, **54**(5): 3726-3747
- [62] BLACIC J D. Mechanical properties of lunar materials under anhydrous, hard vacuum conditions: applications of lunar glass structural components[C]//Proceedings of the Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1985
- [63] AGOSTO W N, WICKMAN J H, JAMES E. Lunar cements/concretes for orbital structures[C]//Proceedings of Engineering, Construction, and Operations in Space. New York: ASCE, 1988: 157-168
- [64] TUCKER D S, ETHRIDGE E C, CURREIR P. Glass

- Fiber Processing for the Moon/Mars Program: Center Director's Discretionary Fund Final Report[R]. Washington: NASA, 1992
- [65] GROSSMAN K. Regolith-Based Construction Materials for Lunar and Martian Colonies[D]. Florida: University of Central Florida, 2018
- [66] EHLMANN B L, MUSTARD J F, MURCHIE S L, *et al.* Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars[J]. *Nature*, 2011, **479**(7371): 53-60
- [67] KARL D, KAMUTZKI F, ZOCCA A, *et al.* Towards the colonization of Mars by *in-situ* resource utilization: slip cast ceramics from Martian soil simulant[J]. *PLoS One*, 2018, **13**(10): e0204025
- [68] KARL D, DUMINY T, LIMA P, *et al.* Clay in situ resource utilization with Mars global simulant slurries for additive manufacturing and traditional shaping of unfired green bodies[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **174**: 241-253
- [69] SONG L, XU J, FAN S Q, *et al.* Vacuum sintered lunar regolith simulant: pore-forming and thermal conductivity[J]. *Ceramics International*, 2019, **45**(3): 3627-3633
- [70] KARACASULU L, KARL D, GURLO A, *et al.* Cold sintering as a promising ISRU technique: a case study of Mars regolith simulant[J]. *Icarus*, 2023, **389**: 115270
- [71] KARL D, CANNON K M, GURLO A. Review of space resources processing for Mars missions: Martian simulants, regolith bonding concepts and additive manufacturing[J]. *Open Ceramics*, 2022, **9**: 100216
- [72] TROEMNER M, RAMYAR E, MARRERO R, *et al.* Marscrete: a Martian concrete for additive construction applications utilizing in situ resources[M]//Earth and Space 2021: Space Exploration, Utilization, Engineering, and Construction in Extreme Environments. Reston: American Society of Civil Engineers, 2021: 801-807
- [73] GARNOCK B, BERNOLD L. Experimental study of hollow-core beams made with waterless concrete[M]//Earth and Space 2012: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Reston: American Society of Civil Engineers, 2012: 119-127
- [74] MILLS J N, KATZAROVA M, WAGNER N J. Comparison of lunar and Martian regolith simulant-based geopolymers formed by alkali-activation for *in-situ* resource utilization[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(1): 761-777
- [75] SCOTT A, OZE C, HUGHES M W. Magnesium-based cements for Martian construction[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2020, **33**(4): 04020019

## 作者简介



程杉杉 女, 2001年10月出生于湖北省咸宁市, 现为华中科技大学土木与水利工程学院硕士生, 主要研究方向为月面原位建造材料体系。  
E-mail: [ss\\_cheng1005@163.com](mailto:ss_cheng1005@163.com)



周 诚 (通信作者) 男, 1982年9月出生于安徽省安庆市, 现为华中科技大学土木与水利工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为地外建造。  
E-mail: [charleschou@163.com](mailto:charleschou@163.com)