

发布时间：2021.02.10

<https://cst.tongji.edu.cn/>

## 火星基础设施建设原位资源利用综述

刘佳雯<sup>1</sup>, 李辉<sup>1\*</sup>, 孙立军<sup>1</sup>, 郭忠印<sup>1</sup>, John Harvey<sup>2</sup>, 汤奇荣<sup>3</sup>, 陆海珠<sup>4</sup>, 贾明<sup>5</sup>

(1. 同济大学, 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海市, 201804)

(2. 加州大学路面研究中心, 加州大学戴维斯分校, 加利福尼亚州, 美国)

(3. 同济大学, 机器人技术与多体系统实验室, 机械与能源工程学院, 上海市, 201804)

(4. 江苏高速公路工程养护技术有限公司, 江苏省南京市, 210046)

(5. 同济大学, 城市交通研究院, 上海市, 201804)

**摘要:** 火星是迄今为止人类探索与了解最多的行星, 并有望成为未来人类移民的目的地。火星移民的美好愿景需要各学科研究者的共同努力, 其中工程建设是必不可少的一环。与地球工程建设相似, 在人类到达之前, 必须解决原材料开发、就地施工、使用与养护等重大科学技术问题。本文基于人类火星探测任务历程与系列探测成果, 系统综述了可进一步用于基础设施建设的火星原位资源, 并结合现代施工技术, 提出了包括3D打印, 无人施工等可行的就地基础设施建设手段。同时列举了火星能源探索的最新进展, 并提出了可能的火星原位能源开发策略。结合火星的极端环境条件, 提出对建筑材料的基本要求及未来的研究机遇与挑战。本文将为中国火星探测计划与火星原位资源开发利用提供参考。

**关键词:** 原位资源利用; 建筑材料; 火星混凝土; 能源开发; 3D打印; 智能施工

## In-situ Resources for Infrastructure Construction on Mars: A Review

Jiawen Liu<sup>1</sup>, Hui Li<sup>1\*</sup>, Lijun Sun<sup>1</sup>, Zhongyin Guo<sup>1</sup>, John Harvey<sup>2</sup>, Qirong Tang<sup>3</sup>, Haizhu Lu<sup>4</sup>, Ming Jia<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. University of California Pavement Research Center, University of California, Davis;

3. Laboratory of Robotics and Multibody System, School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

4. Jiangsu Highway Engineering Maintenance Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

5. Urban Mobility Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China)

### ABSTRACT

It is widely proposed that Mars will be the next destination for human to expand colonization. However, building up a habitat requires collective work from multiple disciplines of which engineering is an indispensable part. Similar to infrastructure construction on the earth, the technical issues of raw material, space construction technologies has to be addressed before human inhabitation. Based on the history of Mars exploration missions and a series of current Mars exploration results, this paper introduced the environment conditions on Mars, reviewed the research of the in-situ resources which could be further utilized for infrastructure construction on Mars and proposed feasible infrastructure construction technologies. Advanced Mars energy exploration research were listed and possible in-situ energy exploitation strategies were proposed as well. This paper provides an overview of in-situ construction material resources, possible construction methods and requirements for materials in extreme environment, which can be a valuable reference for future Mars exploration and possible infrastructure construction on the Mars.

**KEYWORDS:** In-situ Resource Utilization (ISRU), Construction Materials, Martian Concrete, Energy Exploitation, 3D Printing, Intelligent Construction

# 1 引言

## 1.1 研究背景

火星是太阳系八大行星之一，也是距离太阳第四近的行星。由于火星的自转周期及其黄赤交角（赤道平面与公转轨道平面的夹角）与地球相似，所以它的昼夜交替和季节变化与地球非常相似 [1, 2]。火星的这些特征及其独特的地形地貌引起了人们对火星探索和未来火星移民可能性的浓厚兴趣。到目前为止，火星是除地球外人类了解最多的行星。世界范围内已有 30 多个国家的探测器在火星上陆续进行了详细的调查，获得了大量有价值的数据和图像[2]。未来，各国的火星探测任务将持续推进，旨在进一步探索火星的外部环境条件和内部结构，为实现人类移民火星的计划奠定基础。

## 1.2 火星探测历史

火星探测始于 1960 年，苏联发射了人类历史上第一枚火星探测器“Mars 1960A”，该任务虽以失败告终，但却是人类开始探索这颗红色星球的开始。2011 年，欧阳自远等[3]总结了 1960 年至 1990 年期间，火星的探测任务主要由美国（8 次发射，成功 6 次）和苏联（15 次发射，成功 1 次）执行。1971 年，美国国家航空航天局（NASA）发射的“水手 9 号”成功进入环绕火星轨道，并首次拍摄了高分辨率的火星卫星照片，在火星轨道上工作近一年之久[4]。20 世纪末，美国“火星环球勘探者”是历史上最成功的火星探测任务之一，该任务对火星的大气、气候、地质、岩石和土壤的成分进行了深入勘探与分析[5, 6]。步入 21 世纪，人们在宇宙科学与技术方面不断取得突破与革新，火星探测受到了越来越多的关注。许多国家已经或正在计划各自的火星探测任务，包括美国、俄罗斯、欧洲航天局（ESA，简称欧空局）、中国、日本和印度[7, 8]。在 21 世纪初期，美国和欧空局分别开展了其火星探测任务：2001 年 4 月 7 日，美国发射“奥德赛号”火星探测器（目前仍在运行中），使用光谱仪和热成像仪探测火星上潜在的水和冰的证据，并研究火星上的地质和辐射情况[9]。2002 年，“奥德赛”首次发现火星表面及近地层可能存在大量冰冻水。2004 年，欧空局也宣布其“火星快车”探测器在火星南极发现了冰冻水的证据[10]。2020 年 9 月，“火星快车”探测器的 MARSIS 探测雷达仪所采集的数据分析结果显示，火星极地冰盖之下存在着三片以上水域[11]。2004 年，美国总统布什提出将人类移民火星作为宇宙空间探索的终极目标。目前，美国已制定多项火星探测任务并计划在未来的十到三十年内将人类送入火星：2002 年，埃隆·马斯克（Elon Musk）创立了美国宇宙探索技术公司（SpaceX），旨在降低太空运输成本并开发可快速重复使用的发射系统 [12]。2008 年，SpaceX 获得 NASA 正式合同。在 2012 年 10 月，SpaceX“龙飞船”将货物送到国际空间站开启了私营航天新时代。2020 年 5 月 30 日，SpaceX 成功地将载有两名 NASA 宇航员的载人飞船送入轨道，成为第一家将宇航员送入国际空间站(ISS)的私营公司。然而，由于目前新冠疫情（COVID-19）的流行，他们也采取了适当的隔离程序，防止宇航员将 COVID-19 带上国际空间站[13]。2015 年，NASA 发布了人类探索和殖民火星的正式计划，该计划被称为“火星之旅”，如图 1 所示。该计划分为三个阶段：“地球依赖”、“试验场”与“地球独立”。2016 年，中国也启动了首次火星探测任务，并于 2020 年 7 月 23 日将“天问一号”探测器成功送入既定轨道，预计将于 2021 年 2 月在火星着陆，并将巡视探测火星形貌、地质构造及气候特征等[14]。

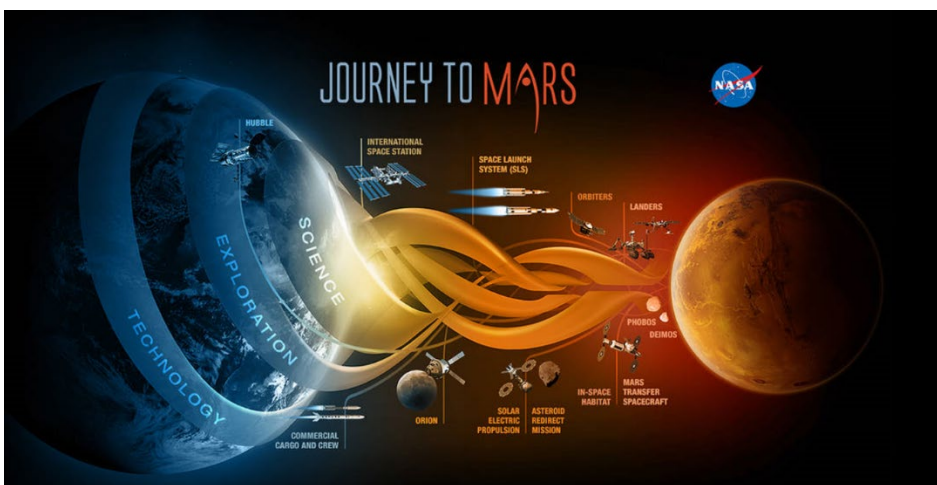


图 1 NASA绘制的“火星之旅”计划示意图[15]

截至 2020 年，火星共有 8 台运行中的探测器，包括 6 台在轨探测器、2 台火星漫游车和 3 台在途探测器，见表 1。人类历史上着陆过的火星探测器着陆点如图 2 所示。

表 1 运行中的火星探测器清单（截至2020年，按发射时间排序）

名称	位置	国家	发射时间	状态
火星奥德赛号 Mars Odyssey	轨道	美国	2001. 04. 07	运行中 (2001-2025)
火星快车号 Mars Express	轨道	欧空局	2003. 06. 02	运行中 (2003-2026)
火星勘测轨道器 Mars Reconnaissance Orbiter	轨道	美国	2005. 08. 12	运行中
“好奇号”火星探测器 Mars Science Laboratory Curiosity	表面	美国	2011. 11. 26	运行中
火星轨道任务 (曼加里安号) Mars Orbiter Mission	轨道	印度	2013. 11. 05	运行中
火星大气与挥发演化探测器 MAVEN	轨道	美国	2013. 11. 18	运行中
微量气体轨道器 ExoMars Trace Gas Orbiter	轨道	欧空局/ 俄罗斯	2016. 03. 14	运行中
“洞察号”火星探测器 InSight	表面	美国	2018. 05. 05	运行中
“希望号”火星探测器 Al-Amal	在途	阿联酋	2020. 07. 20	在途
“天问一号”火星探测器 Tianwen-1	在途	中国	2020. 07. 23	在途
“毅力”号火星探测车 Perseverance rover	在途	美国	2020. 07. 30	在途

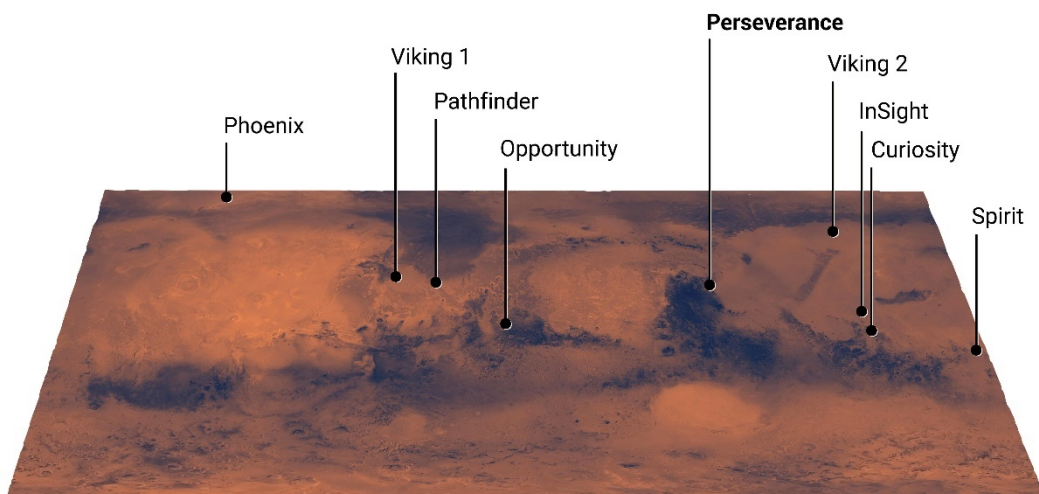


图 2 火星探测器着陆点(截止2020年12月16日) [16]

### 1.3 研究目标

人们认为，火星将成为适宜人类居住的下一个栖息地。然而，火星移民计划需要来自多个学科研究者长期的共同努力，而基础设施建设将成为其中不可或缺的重要一环。与地球上的城市建设一样，原材料开发、宇宙空间下的建设技术、智能管理与养护等系列重大科学技术问题必须在人类到达之前解决。本文综述了近年来人类火星探测取得的一系列成果，重点梳理了可进一步用于基础设施建设的各类火星原位资源，并结合现代施工技术，提出了包括 3D 打印，无人施工等可行的就地基础设施建设手段。

## 2 火星环境概述

### 2.1 地形与地质

Kamps 等人[17]通过聚类方法，利用小型侦察成像光谱仪（CRISM）的多光谱映射模式数据绘制出构成火星表面的不同类型地形图。其主要地形有平原、盆地、火山、山脉、峡谷等。Putzig 等人[18]通过对流层发射光谱仪数据，发现了火星大部分地区的地质层具有不同的热行为。在火星的中纬度地区分布着陆壳或沙漠，而在极地地区则分布着尘土覆盖的岩石和冻结带[19]。

Bibring 等人[20]在南部与北部地壳中均发现了铁镁质硅酸盐，在北极冰冠中发现了冰和霜，在两极发现了二氧化碳冰。美国火星探测器“奥德赛号”发现火星表面主要是玄武岩，其中一些富含橄榄石[21]。“洞察号”探索了火星地表下的结构，主要由红色土尘、风化层和大块岩石组成，如图 3 所示[22]。它还探测到火星是一个地震活跃的行星，但观测到的地震震级较小[23]。

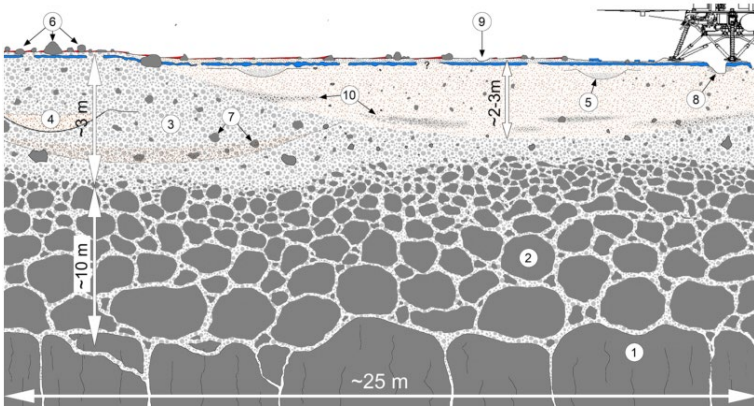


图 3 洞察号着陆器下的浅层地下结构断面[22]

### 2.2 大气组成

火星大气的组成与地球不同，如表 2 所示，地球大气主要由 78.08%的氮气(N<sub>2</sub>)和 20.59%的氧气(O<sub>2</sub>)组成，而火星大气仅由 2.59%的氮气和 0.16%的氧气组成。火星大气中占比最大的是二氧化碳(CO<sub>2</sub>)，并随火星温度变化不断在干冰和气体之间转换。与此同时，由于火星表面的引力只有地球的 38%，导致了更多的气体逸出。致使火星平均气压较低，为 0.636kPa，而地球平均气压为 101.325kPa [24]。另外，由于极地地区二氧化碳的季节性凝结，火星的压力每年变化率在 20%左右[25]。

表 2 火星和地球的主要大气成分对比

大气成分	火星 (%)	地球 (%)
CO <sub>2</sub>	95.1	微量
N <sub>2</sub>	2.59	78.08
Ar	1.94	微量
O <sub>2</sub>	0.16	20.95

### 2.3 气候条件

火星到太阳的距离是 228 万公里，是太阳到地球距离的 1.5 倍。因此，火星接收到的  $586.2 \text{ W/m}^2$  太阳辐射远小于地球接收到的  $1361.0 \text{ W/m}^2$  太阳辐射 [25]。这导致火星的平均温度比地球低，温差更大。火星表面的平均温度为  $-63^\circ\text{C}$ ，日最大温差为  $60^\circ\text{C}$ ，而地球的平均温度为  $15^\circ\text{C}$ ，日最大温差为  $30^\circ\text{C}$  [24]。

## 3 面向基础设施建设的火星原位资源

原位资源利用 (ISRU) 是指收集、处理、储存和使用在其他天体上发现或制造的材料来替代地球上的材料。研究表明，ISRU 可以提供包括水、火箭推进剂和建筑材料在内的一系列相关材料 [26-29]。土木工程和表面施工是 ISRU 的主要领域。本文则主要论述可用于建筑材料的火星原位资源研究。

### 3.1 火星土壤

#### 3.1.1. 火壤概述

多源遥感探测和原位探测数据均表明，火星表面覆盖着大量未固结或弱固结的风化物质。目前，这种物质的定义各不相同，主要包括：风土、风成或河流沉积物、沉积物、灰尘和土壤。2020 年, Certini 等人 [30] 强调有必要从火星土壤的组成和形成的角度统一目前的术语，并认为最好使用“土壤”一词来表示火星上未固结的沉积物。然而，由于已知的信息有限，需要进一步研究土壤的详细分类。图 4 所示的火星土壤在经过筛分后可能会作为建筑材料的集料施用。到目前为止，还没有火星样本返回地球，但是在火星车和轨道飞行器的协助下对土壤进行了远程研究。



图 4 火星土壤 (由美国宇航局的好奇号火星探测器拍摄, 2014) [31]

#### 3.1.2. 模拟火壤

火星土壤只有在地球上合成，用于测试和开发后才能在火星上利用。因此，研究人员基于各种火星探测器反馈的探测数据，重点研究对火星土壤 (火壤) 的模拟 (图 5)。一方面，模拟土壤可以满足科研需求：如天体生物学实验、国际空间站实验、风洞实验、基础设施开发等。另一方面，也可用于探测器在火星表面的着陆、移动和钻孔测试模拟实验。



图 5 模拟土壤样本JSC MARS-1A （由美国宇航局马歇尔太空飞行中心(MSFC)研发）

火星土壤模拟物的传统形成方法包括全岩模拟和单矿物模拟。全岩模拟方法通常选择矿物和化学成分与模拟土壤相似的岩石。单矿物模拟方法则根据模拟土壤的物质组成，选择单一矿物作为原料，或选择不同矿物作为原料。干燥后，将原料粉碎并筛分成不同大小的半成品，然后根据模拟对象的特征进行混合。2011年，欧空局的 Gouache 等人[32] 使用陆地材料研发了三种类型的模拟土壤，并对其物理特性进行了测试。2017年，Chow 等人[33]证明火星土壤模拟物 Mars-1a 可以在无添加剂的情况下直接压缩成固体，揭示了火星原位资源利用的一个可能方面。2018年，Scott 等[34]利用新西兰班克斯半岛的橄榄石玄武岩和火山玻璃制备了模拟土壤，并能有效复刻火星上古谢夫陨石坑的哥伦比亚山地区发现的物质。2020年，刘汉生等人 [35] 系统地回顾了国内外典型模拟土壤的研究进展，并提出了进一步开发各种类型火星土壤的必要性。

美国、欧空局和俄罗斯在模拟土壤技术方面更先进，而中国仍处于起步阶段。目前，模拟土壤已有 40 多种，覆盖火星表面的不同部分。除典型的玄武岩外，还包括酸性、碱性、粘质、泥岩、高氯酸盐、氯化物、硫酸盐、碳酸盐、赤铁矿等火成风化岩[36]。美国、俄罗斯、日本、中国等也分别计划着一系列火星样本返回任务[37, 38]，这将使实际的火星土壤返回地球，进行比在火星表面就地分析更高端、精准的研究。

### 3.2 玄武岩

玄武岩也是火星表面一种常见的岩石。玄武岩是一种火成岩，由暴露在类地行星表面或其附近的富含镁和铁的熔岩冷却而形成[39, 40]。2000年，Bandfield 等人[41]利用火星全球探测器(MGS)的 TES 数据，确定了火星低反照率区域的组成和分布，提出该区域由斜长石和斜辉石组成的玄武岩和由斜长石和火山玻璃组成的安山岩组成，如图 6 所示。2007年，Roger 和 Christensen [42]利用 TES 将火星表面岩石分为 4 类:富含高硅玻璃的石灰灰玄武岩、含橄榄石的辉石玄武岩、含橄榄石的石灰灰玄武岩和含石灰灰玄武岩。2015, Kading 和 Straub [40] 提出了一项未来人类火星探测任务，即利用火星上常见的原位玄武岩资源结合 3D 打印技术建造基础设施。

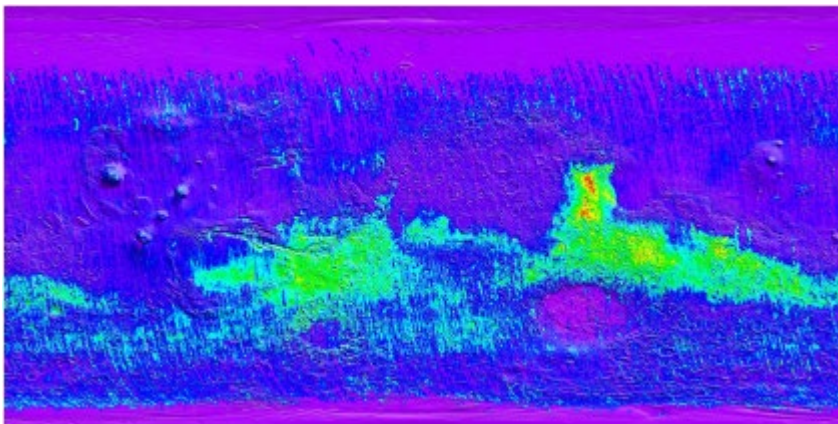


图 6 火星南部高地的玄武岩分布 (绿色代表玄武岩) [41]

玄武岩可广泛应用于建筑(如作为建筑砌块或路面材料)、制作鹅卵石和装饰工艺品。玄武岩加热挤压产生石棉,石棉是一种保温材料。然而,与火星土壤类似,必须在陆地上对火星上的几种玄武岩成分进行表征,以便更好地了解其在火星环境中的用途。

### 3.3 火山灰

火星上有许多火山地貌。大型盾状火山主要分布在塔尔西斯隆起和极乐高地。在爆发的火山运动中,固体岩石和熔融浆液被分解成细小的颗粒,形成火山灰。火星之所以是红色的,是因为在古代,火星表面覆盖着大量含铁火山灰,经过氧化后变成了红色。“火星快车号”探测器拍摄了子午线平原上的火山灰沉积物,如图 7 所示,主要由辉石和橄榄石组成。火山灰与石灰(CaO)在室温和有水存在的条件下发生反应,形成具有水力胶凝能力的水合物。因此,它可以作为水泥的搅拌材料和研磨后的混凝土的外加剂。

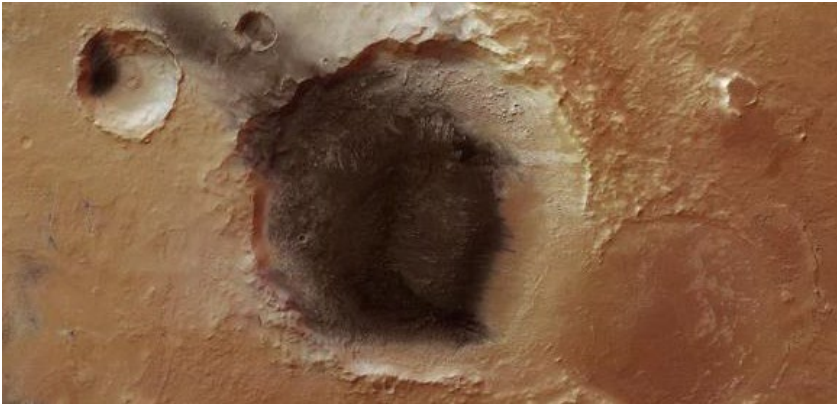
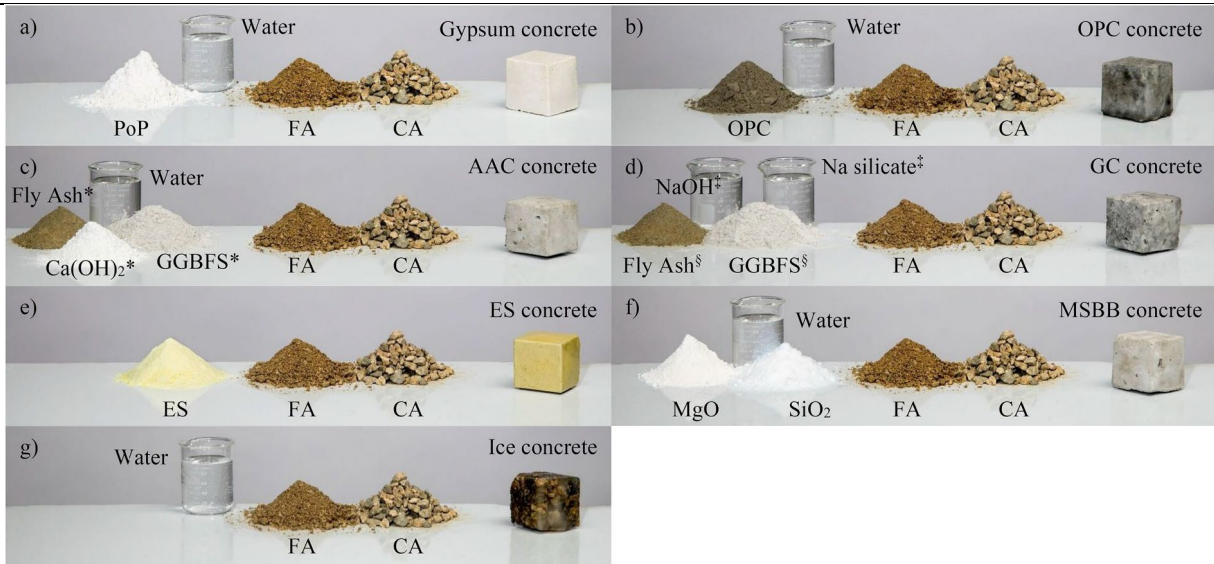


图 7 火星Meridiani平原的火山灰沉积物

### 3.4 火星混凝土

火星混凝土的制备与应用需要对火星现有的原位资源进行全面的综述。要在火星环境中制造混凝土,首先要探索生产混凝土的潜在原材料,包括粘结剂、水和骨料。如前所述,火星的玄武岩与筛分后的火壤可以作为粗、细骨料。另外,最新的探索结果表明火星上存在冰,因此水可以通过部分手段制备获得[11, 43]。对于潜在的粘结剂,水泥是地球上常用的粘结剂,硅酸盐水泥的主要化学成分是氧化钙、二氧化硅、氧化铁、氧化铝和水。水泥能在空气中或水中硬化,并牢固地将砂石等材料粘结在一起,是良好的建筑材料。因此,如果类似的材料可以在火星环境中找到,混凝土的生产将成为可能。

自 2006 年以来, NASA 团队一直在研究多种类型的粘结剂,并将它们与火星土壤混合用于建筑应用[26]。2016 年, Wan 等人[44] 结合火壤和熔融硫粘结剂开发了火星混凝土,发现这种混凝土具有更高的强度,在火星大气压力和温度范围内施工可行。NASA 现在已经扩大了研究范围,包括其他可以在行星表面产生的粘结剂,如硫、聚合物等。2017 年, Ordonez 等[45]研制了普通硅酸盐水泥(OPC)和基于氧化镁的 Sorel 水泥并对其进行了超高速冲击性能测试,结果表明骨料的级配将影响材料测抗冲击性能。2018 年, Scott 等 [34] 指出可以开发橄榄石水解(即蛇纹岩化)及其相关产品。包括使用菱镁矿( $MgCO_3$ )生产镁基水泥,这一过程中产生的氢( $H_2$ )可以作为能源加以利用。Rechtes [46] 系统列出了火星上可能适用的粘结剂类型,包括玄武岩、石膏、蛋白石和硫酸铁等。图 8 显示了文中提出的火星混凝土采用的粘结剂、集料的具体配方[46]。



注: FA 表示细骨料, CA 表示粗骨料

图 8 火星混凝土的适用成分[46] (从左至右依次为粘结剂、骨料和混凝土试件)

可以参考的是, 利用月球土壤制备混凝土目前已有相当的研究成果, 所采用的粘结剂包括树脂、环氧树脂和地质聚合物。此外, 还有一种使用地聚合物开发的混凝土衍生物。地聚合物是由铝硅酸盐原料与碱性溶液 (NaOH 等) 反应而产生的材料。Montes 等[47]的研究表明这种地聚合物粘结剂可以从火星风化层中生产出来, 其抗压强度可达 16.6~33.1MPa。

### 3.5 金属与合金

2009 年, Fairen 等人[48] 对玄武岩风化过程中火星上流体的冻结和蒸发过程进行了模拟, 发现在低温 (273K 以下)下, Si、Fe、S、Mg、Ca、Cl、Na、K 和 Al 中有相当一部分仍保持液态。2018 年, Naser [49] 提出虽然金属在火星上并不容易获取, 但现有的这些元素可以被提取并用于生产金属和合金。2019 年, Naser [27, 28] 进一步提出在各种金属中, 镁, 铁和铝由于其机械性能和在建筑中的使用, 适合在火星上进行早期的开发研究。

### 3.6 火星能源开发

事实上, 许多火星原位资源开采加工活动涉及复杂的机械操作和能量转换, 且大多以电力为主要能源。目前用于火星探测的先进能源技术是放射性同位素温差发电技术和太阳能电池板, 大多数运行中的火星车和探测器使用太阳能和核能作为驱动能源。此外, 智能配电管理和储能技术也在逐步发展。

1. 放射性同位素温差发电技术: 利用热电转换效应, 将放射性同位素的衰变热转化为电能。这种发电方法虽然效率低、成本高, 但能质比高, 使用寿命长。由于该方法不受外部环境的影响, 已成功应用于军事侦察卫星和通信卫星。在月球表面和深空探测等宇宙空间任务中, 它仍然是首选的核动力源。目前, 美国仍然是世界上放射性同位素温差发电技术的领军者;
2. 太阳能电池板: 指利用单个太阳能电池形成方阵将光能转化为电能的电力系统。太阳能电池板在航天器上的两个主要功能是: 提供传感器运行动力和推动航天器(即太阳能电力推进)。迄今为止, 太阳能已被广泛应用于围绕火星运行的航天器, 如火星全球勘探者 (Mars Global Surveyor) 和火星观察者号 (Mars Observer), 如图 9 所示。目前, 太阳能仅用于为各种火星探测器提供能源。在未来, 是否有可能直接聚焦太阳光, 将太阳能转化为机械制造的动力? 2017 年 ESA 曾将聚光设备与 3D 打印相结合, 在 1000℃ 下开发月壤转, 验证了太阳能 3D 打印工程材料的可行性。类似的研究是否也可以在火星上进行? 但值得注意的是, 火星表面的沙尘暴会很容易覆盖太阳能电池板, 导致发电效率显著降低。为了有效解决这一问题, 首先可以在地球研究太阳能电池板在沙漠中的应用。





图 9 安装太阳能电池板的火星观察者号

3. 其他潜在火星原位能源：依靠太阳能电池或同位素热电发电机将不能提供充足和持续的能源供应。因此，只有开发原地供能技术，才是在火星表面实施各项任务的关键。火星探路者号、好奇号等多个火星探测器对火星表面风速的探测结果发现，火星表面风速一般为 2~7 m/s，但也记录了 40 m/s 的风暴。沿着火星经度的大气压力和温度的差异会在火星表面造成巨大的沙尘暴。火星表面的沙尘和尘暴会严重影响火星的探索 and 太阳能的利用，但另一方面，它们也是潜在的风能资源。利用火星风力资源主要是将大气粒子运动的部分动能转化为电能、热能或机械能。今后有必要加强对火星大气环境和风况的探测。在火星上建造风力发电设备，需要尽可能降低设备的质量，采用新材料、新设计，使风力发电系统能够适应火星的低温、沙尘暴等恶劣气候条件。

#### 4 火星表面施工技术

原位资源必须被处理和建造成人们可以使用和居住的基础设施。2019 年, Reches [46] 设想了采用火星混凝土来建造混凝土结构,如图 10 所示。这也表明，我们在地球上所生产的混凝土在火星上并不总是可行的，需要结合太空环境条件与气候等具体分析。

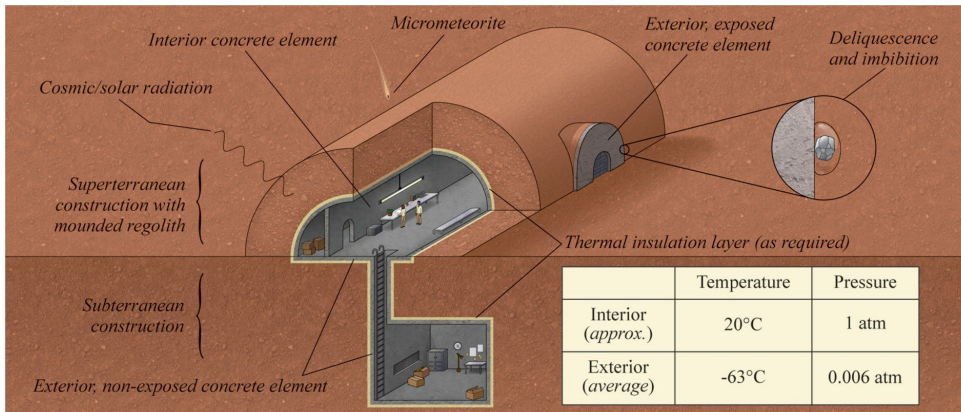


图 10 具有不同材料特征的火星混凝土构筑物[46]

##### 4.1 加工方法

火星土壤的加工方法可以借鉴月壤的相关技术。在月壤方面，研究者们[50, 51]提出了大量的土壤原位处理方法，包括常温下碱活化、月球混凝土等技术，以及燃烧合成、蒸汽干燥搅拌法、烧结法等高温技术。还有一些研究人员 [50, 52] 提出的策略包括干拌蒸压养护混凝土(DMSI)方法和硫磺混凝土作为非水力混凝土衍生建筑材料。利用太阳能烧结在未来有望成为火星混凝土生产的一项主导技术，因为火星表面缺少大气，因此可以获得更多的太阳照射。2018 年，Meurisse 等[53] 利用太阳能和 3D 打印技术制成月球混凝土砖，但其抗压强度不能满足月球建筑的要求。

## 4.2 3D 打印

3D 打印混凝土不仅可以应用于非线性、自由曲面等复杂形状建筑的建造，在未来空间探索中有望就地采用资源进行人类太空基地的建造。自 1970 年代 3D 打印技术（也称增材制造技术）发明以来，在过去的几十年中逐步趋于成熟，并且可以通过 3D 打印技术来实现火星表面的增材制造。美国国家航空航天局（NASA）和美国陆军工程兵团（USACE）正在分别为行星表面基础设施元件，如混凝土建筑和施工屏障等寻求增材制造方法。因此，3D 打印对于火星移民计划具有重要意义。2014 年，美国宇航局与美国太空设计公司（MIS）合作，实现了世界上第一个太空 3D 打印技术，该公司专门设计和制造用于微重力的三维打印机。2015 年，Kading [40]建议将 3D 打印机应用于圆顶结构中，以保持承压的工作环境，如图 11 所示。2017 年，欧空局[53]利用德国科隆航天中心设备，在 1000°C 下，逐层打印制造了月球混凝土砖，初步验证了 3D 打印技术的可行性。王锐[51]系统综述了月壤资源增材制造技术的发展概况，指出能量转换效率、极端环境条件和制造材料性能将是未来月球 3D 打印技术的重要研究方向。

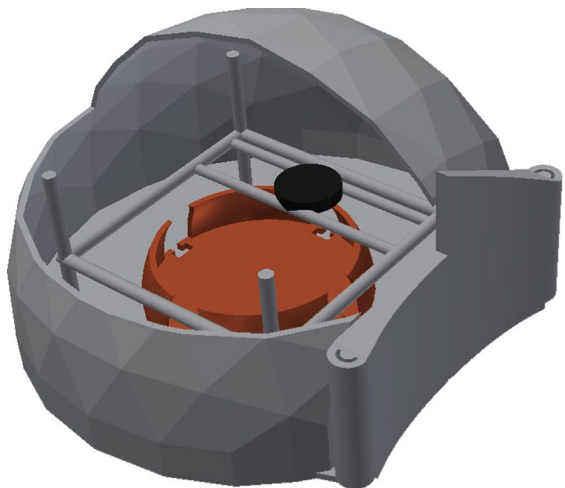


图 11 3D打印机在圆顶结构中工作示意图[40]

## 4.3 智能建造

Kading's 在研究中提出[40]，火星 IRSU 分为两个主要任务：一是无人值守准备任务，涉及建立支持人类生活的必要基础设施；二是让人们到达火星表面并居住在基础设施中。因此，不可避免地需要开发和应用智能建造技术。考虑到火星的恶劣条件，开发机器人、建立无人施工管控系统等将是可行的。这一无人施工系统需要能够精准定位、进行结构设计并做出与施工相关的实时决策。在火星上使用机械手臂，机器人等执行建筑任务对于减少恶劣的太空环境对人类的危害非常重要。

目前，现代工程施工在地球上基本可以实现机械的自动控制，包括：施工机械的位置识别、土方施工的智能控制、道路的智能摊铺和压实等。这些技术可将在宇宙空间环境中进一步实施。实际上，月球已有相关研究[54]关注到道路自主施工设备，并研究将机器人送上月球执行空间施工任务的可能性。然而，应该注意的是，机器人和施工机械也必须由具有弹韧性的材料制备而成，以适应太空的工作环境。

## 5 挑战与机遇

### 5.1 研究面临的挑战

宇宙空间建筑材料必须满足以下三个要求：弹韧性、耐久性和经济性。

- 弹韧性：主要包括温度适应性与抗撞击能力。例如，材料的温度适应性要求要求建筑材料既能承受高温、忍受低温、适应较大温差的同时还要满足人体保温的需要[55]。此外，考虑到火星本身的地震活动与来自其他太空天体的撞击，建筑材料还需具有一定的抗撞击能力，在正式应用前需要进行防撞测试。
- 耐久性：3D 打印技术对于使用的材料具有特定要求，例如以特定的可预测形状进行沉积的能力，在设置的时间段后支撑叠加层的能力，与上下两层粘合的能力以及保证结构完整性。另外考虑到恶劣的环境条件，有必要确保材料在火星低温和低压环境下的强度，并具有抵抗强紫外线和太阳辐射的功能。这里可以使用某些反射材料达到反射太阳辐射、降低辐射强度并防止材料老化，实现建筑材料的高强与耐久。

- 经济性: 原位资源利用的原因主要在于从地球运输材料至太空的价格昂贵。如何采用适当的决策方法权衡火星原位资源开采与利用与从地球运输必要的材料之间的经济性是未来研究面临的挑战之一, 必要时还需进一步将决策范围扩大至全寿命周期, 并适当采用全寿命周期分析方法辅助决策。

## 5.2 未来研究机遇

火星土壤、玄武岩和混凝土材料将是未来人类火星任务中较为可行的建筑材料。混凝土材料及其衍生物被认为在宇宙空间建设中具有最高的应用潜力。与此同时, 模拟土壤还可以应用于地球上工业领域的新材料的合成和开发。然而, 由于对火星土壤组成和环境条件的研究有限, 火星原位资源在基础设施建设中的应用还需要在以下两个方面做进一步研究:

- 耐久性材料开发: 包括进一步寻找火星表面、浅层地下层、深层地下空间高可开发和利用的原位资源; 研究适用于火星环境条件下的材料加工工艺; 确保材料在火星低温和低压环境下的强度, 并具有抵抗强紫外线和太阳辐射的功能; 确保建筑材料的抗震、抗撞击能力等。
- 火星原位能源开发: 人类的火星能源探索仍处于自给自足阶段。核能和太阳能是当前开发利用的热点与主要目标。未来可进一步就地开发的火星能源包括核能、太阳能和风能。针对火星能源探测问题, 有必要考虑发电系统在极低温与交变热负荷下换热元件的变形、老化和失效。同时, 要保证发电系统的输出可持续性, 必要的储能技术还需要进一步研究并结合。
- 智能建造技术: 包括寻求可开发的施工环境(如地下空间开采); 提供持续稳定的机械能提高能源转换效率; 适应太空环境的施工器械研发; 无人施工的实时操控与精准指挥等。

## 6 结论

火星是太阳系中与地球最相似的行星, 在火星上发现了水, 可能还发现了生命, 这激发了人们对进一步探索火星的兴趣。在前往火星之前, 提出一些适当的设想是十分必要的。本文主要提出了三种用于火星基础设施建设的原位资源类型, 并对相关研究进行了综述。研究结论如下:

1. 火星土壤、玄武岩和火星混凝土等原位资源是未来在火星上最可行的建筑材料。然而, 这些材料应能承受低压、低温、大温差和来自于宇宙射线和太阳的强辐射。火星混凝土在恶劣宇宙环境条件下的成型工艺和维护方法需要深入研究。
2. 核能和太阳能是火星能源探索的主要目标。未来可进一步就地开发的能源包括核能、太阳能和风能。实现稳定、持续的能源支撑, 还需要能源组合和储能技术的支撑。
3. 火星上实行智能建造是十分必要的。由于火星环境对人体的损害仍然未知, 可以应用3D打印技术利用火星的原位资源进行增材制造, 并结合无人化机械施工与和自动监测控制系统来执行智能施工过程, 实现对构筑物智能化运行与维护的目的。
4. 在寻求合适的火星原位建造资源和深入了解火星环境条件的基础上, 开发满足弹性、耐久性和经济性要求的材料将是未来的重点研究方向。

## 参考文献:

- [1].David Alderton, S.A.E., Encyclopedia of Geology (Second Edition). 2021: Academic Press. 94-107.
- [2].Ziyuan, O. and X. Fugen, The Mars and its environment. Spacecraft Environment Engineering, 2012. 29(06): p. 591-601.
- [3].Ziyuan, O. and X. Fugen, Major scientific issues involved in Mars exploration. Spacecraft Environment Engineering, 2011. 28(3).
- [4].NASA, Mariner 9: Details. 2011.
- [5].Cook, R.A. and A.J. Spear, Back to Mars: The Mars Pathfinder mission, in 1998 International Astronautical Federation. 1998.
- [6].Thomas, N., et al., Spectral heterogeneity on Phobos and Deimos: HiRISE observations and comparisons to Mars Pathfinder results. Planetary and Space Science, 2011. 59(13): p. 1281-1292.
- [7].Wikipedia, Exploration of Mars.
- [8].National Geographic, Mars Exploration, Mars Rovers Information, Facts, News, Photos. 2009.
- [9].Wilson, J.T., et al., Equatorial locations of water on Mars: Improved resolution maps based on Mars Odyssey Neutron Spectrometer data. Icarus, 2018. 299: p. 148-160.

- [10]. Encrenaz, T. and C. Sotin, Special Issue: First results of the Planetary Fourier Spectrometer aboard the Mars Express mission. *Planetary and Space Science*, 2005. 53(10): p. 961.
- [11]. Lauro, S.E., et al., Multiple subglacial water bodies below the south pole of Mars unveiled by new MARSIS data. *Nature Astronomy*, 2021. 5(1): p. 63-70.
- [12]. Wikipedia, SpaceX.
- [13]. Masunaga, S., SpaceX is launching its first human crew to space Saturday. How coronavirus affected preparations, in *The Los Angeles Times*. 2020.
- [14]. Zou, Y., et al., Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission. *Advances in Space Research*, 2021. 67(2): p. 812-823.
- [15]. NASA, NASA's Mars Exploration Program.
- [16]. Photojournal, PIA24320: Mars Landing Sites, Including Perseverance (Illustration). 2020.
- [17]. Kamps, O.M., et al., Defining Surface Types of Mars Using Global CRISM Summary Product Maps. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-PLANETS*, 2020. 125(e2019JE0063378).
- [18]. Putzig, N.E. and M.T. Mellon, Apparent thermal inertia and the surface heterogeneity of Mars. *ICARUS*, 2007. 191(1): p. 68-94.
- [19]. PUTZIG, N. and M. MELLON, Apparent thermal inertia and the surface heterogeneity of Mars. *Icarus*, 2007. 191(1): p. 68-94.
- [20]. Bibring, J.P., Mars Surface Diversity as Revealed by the OMEGA/Mars Express Observations. *Science*, 2005. 307(5715): p. 1576-1581.
- [21]. Christensen, P.R., et al., Morphology and Composition of the Surface of Mars: Mars Odyssey THEMIS Results. *Science*, 2003(300).
- [22]. Golombek, M., et al., Geology of the InSight landing site on Mars. *Nature Communications*, 2020. 11(1).
- [23]. Banerdt, W.B., S.E. Smrekar and D. Banfield, Initial results from the InSight mission on Mars. *Nature Geoscience*, 2020. 3(13).
- [24]. Williams, D.R., Mars Fact Sheet. 2004.
- [25]. Leovy, C., Weather and climate on Mars. *Nature*, 2001. 6843(412): p. 245-249.
- [26]. Sanders, G.B. and W.E. Larson, Integration of In-Situ Resource Utilization into lunar/Mars exploration through field analogs. *Advances in Space Research*, 2011. 47(1): p. 20-29.
- [27]. Naser, M.Z., Space-native construction materials for earth-independent and sustainable infrastructure. *Acta Astronautica*, 2019. 155: p. 264-273.
- [28]. Naser, M.Z., Extraterrestrial construction materials. *Progress in Materials Science*, 2019(105).
- [29]. Starr, S.O. and A.C. Muscatello, Mars in situ resource utilization: a review. *Planetary and Space Science*, 2020. 182: p. 104824.
- [30]. Certini, G., et al., Disambiguating the soils of Mars. *Planetary and Space Science*, 2020. 186: p. 104922.
- [31]. Photojournal, PIA17944: Curiosity's Color View of Martian Dune After Crossing It. 2014.
- [32]. Gouache, T.P., et al., Soil simulant sourcing for the ExoMars rover testbed. *Planetary and Space Science*, 2011. 59(8): p. 779-787.
- [33]. Chow, B.J., et al., Direct Formation of Structural Components Using a Martian Soil Simulant. *Scientific Reports*, 2017. 7(1).
- [34]. Scott, A.N. and C. Oze, Constructing Mars: Concrete and Energy Production From Serpentinization Products. *Earth and Space Science*, 2018. 5(8): p. 364-370.
- [35]. Hansheng, L., et al., Research Progress of Typical Martian Soil Simulants. *Manned Spaceflight*, 2020. 26(03): p. 389-402.
- [36]. Xingjie, L., et al., Research on Soil Mechanical Properties of Martian Surface Soil. *Manned Spaceflight*, 2016. 22(4).
- [37]. Chang, K., Bringing Mars Rocks to Earth: Our Greatest Interplanetary Circus Act - NASA and the European Space Agency plan to toss rocks from one spacecraft to another before the samples finally land on Earth in 2031, in *The New York Times*. 2020.
- [38]. Yan, G., et al., A Brief Introduction of the First Mars Exploration Mission in China. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018. 5(5).
- [39]. Craddock, R.A. and M.P. Golombek, Characteristics of terrestrial basaltic rock populations: Implications for Mars lander and rover science and safety. *Icarus*, 2016. 274: p. 50-72.
- [40]. Kading, B. and J. Straub, Utilizing in-situ resources and 3D printing structures for a manned Mars mission. *Acta Astronautica*, 2015. 107: p. 317-326.
- [41]. Bandfield, J.L., V.E. Hamilton and P.R. Christensen, A global view of Martian surface compositions from MGS-TES. *Science*, 2000(287): p. 1626-1630.
- [42]. Rogers, A.D. and P.R. Christensen, Surface mineralogy of Martian low-albedo regions from MGS-TES data: Implications for upper crustal evolution and surface alteration. *Journal of Geophysical Research*, 2007. 112(E1).
- [43]. Rickman, H., et al., Water in the history of Mars An assessment. *Planetary and Space Science*, 2019(166).
- [44]. Wan, L., R. Wendner and G. Cusatis, A novel material for in situ construction on Mars: experiments and numerical simulations. *Construction and Building Materials*, 2016. 120: p. 222-231.
- [45]. Ordonez, E., et al., Hypervelocity impact testing of materials for additive construction: Applications on Earth, the Moon, and Mars. *Procedia Engineering*, 2017. 204: p. 390-396.
- [46]. Reches, Y., Concrete on Mars: Options, challenges, and solutions for binder-based construction on the Red Planet. *Cement and Concrete Composites*, 2019. 104: p. 103349.

- 
- [47]. Montes, C., et al., Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications. *Advances in Space Research*, 2015. 56(6): p. 1212-1221.
- [48]. Fairen, A.G., et al., Stability against freezing of aqueous solutions on early Mars. *NATURE*, 2009. 459(7245): p. 401-404.
- [49]. Naser, M.Z. and A.I. Chehab, Materials and design concepts for space-resilient structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018. 98: p. 74-90.
- [50]. Zhenping, S., et al., Research progress and prospect of lunar concrete. *China Concrete*, 2019(05): p. 26-32.
- [51]. Rui, W., Experimental and Numerical Study on Lunar Regolith Solar 3D Printing for Engineering Material Utilization. 2020, Harbin Institute of Technology. p. 81.
- [52]. Lihua, L., et al., Review on lunar concrete. *Concrete*, 2011(263).
- [53]. Meurisse, A., et al., Solar 3D printing of lunar regolith. *Acta Astronautica*, 2018. 152: p. 800-810.
- [54]. Brooks, R.A., et al., Lunar Base Construction Robots, in *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*. 1990.
- [55]. 谢和平, 张国庆与李存宝, 月球恒温层地下空间利用探索构想. *工程科学与技术*, 2020. 52(01): 第1-8页.