

## Proposal of Mars Terraforming Technology Verification

## 火星宜居化技术验证设想

■ 贾阳 刘振春 崔尚文 (中国空间技术研究院)

火星是地球的邻居，从表面环境、资源、距离等因素分析，是人类移民的首选。然而，在火星表面建立人类的宜居环境，相对人类现在的科技水平而言，是一项巨大的挑战，尚无法准确描绘火星移民工程的技术路线图。但是，这并不妨碍对火星宜居化（MtoE）技术进行展望。



## 1 引言

人类早晚有一天要移民到地外星球,比如火星。虽然现在还无法预测那一天有多么遥远,但这并不妨碍现在就开始策划做些基础工作,验证一些移民必需的关键技术,想一想都很激动人心。

在那一天到来的时候,人类的科技水平一定有了极大的发展,也许用到的科技原理现在还没有认识到,这无法被超越,就让后人原谅今人的无知,以现在能够想象的技术,预测一下这划时代的壮举。

移民是要呼吸的,工作时随身携带的“氧立得”,消耗碱金属,利用火星大气生成氧气。但是居住在城堡里面,移民可以自由呼吸,那里的氧气是生物氧,而且是免费的。火星水的价格很低,如果非要喝一杯进口的地球水,那只能支付不菲的火星币了。但是有一句名言,“人的一生一定要喝一杯地球水”,不仅仅是因为地球水的口味,更因为那其中的怀旧与感伤。

城堡的壳是玻璃高温打印的,最常用的形容词是晶莹剔透,老人和孩子一般是不离开城堡的,担心辐射导致衰老变快。移民都很注意保养,去野外工作前,都要涂抹防辐射霜。城堡的地下部分温度保持在 $-20^{\circ}\text{C}$ ,很多移民不愿意去地球旅行,就是因为那里几乎都是热带地区,居民平均寿命低于移民。只有地球的两极稍好些,建设了很多移民度假村,不过最近的汇率又升高了,很多度假村的低重力雪道上已经见不到移民的身影。

旅行用的输运舱,加速和减速的时候,还是选用化学燃料,最常用的推进剂是液态CO与液态 $\text{O}_2$ 、有时也用液态 $\text{CH}_4$ 和液态 $\text{O}_2$ 。长时间飞行主要靠太阳帆,这些帆在地火等行星之间穿梭,有多条旅行线路可供

选择。

在火星表面短距离旅行的运输工具是电动车,如果远行,为了节省时间,只能用磁力炮了。核能、太阳能在能源结构中的比例已经开始下降了,风能发展方兴未艾。

好吧,让思绪回来,当下能为移民做些什么技术准备呢?至少包括液态CO与液态 $\text{O}_2$ 制备技术、 $\text{SiO}_2$ 高温打印、太阳帆、微生物制氧、宏尺度的风能利用。

## 2 火星宜居化

### 人类火星活动的发展

人类生存的基本条件包括食物、阳光、水、氧气等,长期生存的条件还包括生产工具、可开发的资源、医疗保障等等。

少量人类个体的探险型火星表面短期生存,其生命保障所需要的水、食物、氧气、温度等保障条件,可以完全利用地球的资源满足。这种类型的活动,对火星表面环境会有轻微的改变,着陆时也需要利用火星大气减速,但总体来看,人类生存所需的资源不依赖火星。

为了在火星表面较长时间活动,人类开始开发利用火星的资源,服务往返任务,逐渐发展到开发矿藏,服务地球的社会发展。例如,利用火星大气的 $\text{CO}_2$ 资源,生产返回地球用的推进剂;开发铂等贵金属矿藏,并运回地球。

进一步发展到移民型活动,移民在火星上所需的基本生存资源需要实现本地化,对地球的依赖仅限于少量、个别,类比于森林文明对枪支弹药、铁器的需求,或者青藏高原文明对茶、盐的需求。这种活动

的进一步发展,物质交换的“脐带”、心理的“脐带”也可以断开,至少这种断开已不会使移民社会发展停滞。

人类移民火星的发展里程碑可能包括:

- 人类探测器到达火星;
- 人类探测器到达火星表面;
- 探测器实现火星表面巡视探测;
- 火星表面采样返回地球;
- 人类到达火星表面;
- 实现火星资源利用,生产火箭推进剂;
- 掌握火星表面水资源利用技术;
- 建立包括地火的行星际通信系统;
- 出现在火星表面工作次数超过1次且累积工作时间大于1火星年的航天员;
- 平民经过短期训练后,到达火星表面;
- 适应火星表面环境的生物基因改造工程实现;

- 城堡式宜居化环境建设完成;
- 建设包括光能、核能、风能的完备能源系统;
- 火星资源反哺地球;
- 出现火星移民,到达火星后的任务列表中,不包括返回地球;
- 第一个火星人生;
- 正常死亡人类长眠火星;
- 发现演化形成的火星特有物种;
- 火星人到地球旅行;
- 移民生产、生活资源自给;
- 移民自治;
- 隔离产生,隔离可能包括物质、心理、语言、文化、技术发展路线、生殖等方面;
- 人类亚种间爆发战争……

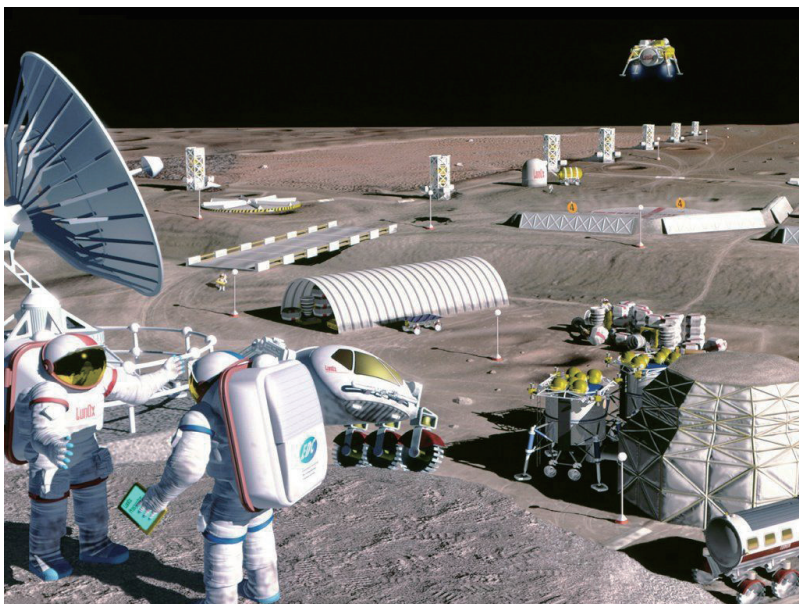
### 资源利用

可以看出,不同类型的火星活动,对资源的需求是不同的,进入到开发型活动阶段后,宜居化技术就已经成为必需,其发展目标是实现资源本地化比例的不断提高。

火星可以利用的资源至少包括:

1) 光。虽然火星轨道上阳光的光强仅为地球附近的40%,但是从发电的角度看,仍然可以看作是取之不尽的能源。火星表面的光强由于大气吸收、散射等原因,进一步下降,而且受尘暴的影响,光强变化范围较大,但仍然是火星表面活动的成本最低的能量来源。

2) 大气。火星表面大气的压强仅为地球表面的1%,主要成分是 $\text{CO}_2$ ,可以



▲ 人类火星活动模拟图



在推进剂生产、风能发电中作为本地资源利用。

3) 盐。火星土壤中含有丰富的硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、氯化物等盐类,通过冶炼技术,可以实现建筑材料以及铁合金、铝合金的本地化生产。

4) 水。已经探明在火星两极地区有固态水,其开采、运输对移民的生产、生活均具有重要的意义。

### 宜居化的挑战

火星环境是最接近人类的宜居环境,但是火星的尘暴、低气压、低温环境,对人类的长期生存仍然是巨大的挑战,火星宜居化是人类文明的最大挑战之一。火星全球化的宜居改造,涉及的技术挑战十分巨大,从更具现实性的角度考虑,本文的讨论局限在城堡式宜居化及全火面活动的层面。宜居化环境构建面临的挑战包括:

1) 低重力。低重力将引起人类骨骼的钙缺失,但从长期看,人类是可以适应这种低重力环境的。

2) 氧气。为了减少野外工作服设计的复杂性、操作的灵活性,以及居住环境的建设成本,城堡内部的压力可以考虑选择 $0.3 \times 1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ 的纯氧环境。

3) 温度。实现环境温度控制的最好手段是建筑在半地下。火星土壤的浅层,可以实现恒温,随着深度的增加,温度会有升高。居住区可以建设在土壤的浅层结构中,既方便光能利用,又能降低环境温度调节的复杂程度。

4) 辐射。探测成果表明,人类使用防护服,可以短期适应火星表面的辐射环境。为了避免长时间的累积效应,更好地防护一次辐射、二次辐射,可以利用建筑材料实现。

5) 食物。发展氧化性土壤改性、适应火星环境的生物基因改造、无土栽培等技术,利用生物光合作用实现氧气、食物的生物化生产。

宜居程度的提高,既包括通过技术发展,实现

火星环境的局部改造,也包括移民通过生物演化进程,更加适应改造后的火星环境。

### 宜居化的特征

宜居化环境的基本特征包括:

1) 长期性。宜居化的目标是人类在火星表面的长期生存,因此宜居化环境建设涉及的方法、技术需要符合可持续发展的需要,不能对周边环境产生危害。

2) 安全性。宜居环境着眼于人类居住的安全,通过多个居住区的局部隔离、备份冗余等手段,使生态系统具备一般性故障的应对能力。对小概率的灾难性事件,也需要具有一定的应对能力,如陨石撞击等。

3) 自给性。随着宜居化技术的发展,资源的本地化满足程度逐渐提高,系统对外部资源的依赖局限在少量火星稀缺资源,实现绝大部分资源需求满足的本地化。

4) 发展性。利用火星资源,发展技术,不断提高环境的宜居程度,实现持续发展。

## 3 火星宜居化技术需求

为了实现火星表面环境改造和城堡式宜居环境的目标,对其技术需求分析如下。

### 电

最简单的能源获得方式是太阳能。在火星表面,可以利用火星光谱匹配的太阳能电池阵,通过光伏效应将太阳能转换为电能,转换效率大于30%,可以辅助以聚光等手段,提高单位面积太阳能电池的能源转换效率。为了提高能源供应的稳定性,考虑在火星轨道构建太阳能发电系统,通过激光实现能量的定向传输。

除了光能的利用外,核能的利用也必不可少,同位素衰变的能量有限,有发展前途的还是可控核聚变。

为了最大程度实现能源利用,还需要关注风能、温差发电、微生物燃料电池等能源获得方式,但是在提高能源转换效率方面的技术难度都较大。例如,火星表面气压很低,其风能利用难度较大,需要发展全方向适应的大尺寸风能转换设备。

在能量的存贮方面,还需要发展超级电容等高能量密度存储设备。

### 氧

火星表面短期活动的制氧方式可以利用碱金属及火星表面充足的 $\text{CO}_2$ 资源。也可以利用 $\text{H}_2\text{O}_2$ 催化分解方法,同时满足生存所需要的两个重要条件。催化剂一般选用基于过渡金属锰、钴、铅等的金属盐和氧化物。工业化的制氧手段可以采取 $\text{CO}_2$ 分解法,再通过膜分离或分子筛技术分离 $\text{O}_2$ ,其反应为 $2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$ 。水的电解,以及在矿物开采过程中,通过加热硝石等矿物,也会产生 $\text{O}_2$ 。

成本更低的制氧方法是生物制氧,包括利用微生物和植物制氧。早期主要方式为微生物制氧,微生物适应的环境范围较广,例如弗兰兹曼(Franzmann)等在南极艾斯湖底层水中分离到嗜冷的乳酸细菌,微生物制氧的运行条件较容易满足,光能自养生物在无机环境生长繁殖,利用 $\text{CO}_2$ 作为碳源,利用铵盐或硝酸盐为氮源,完成繁殖。光能自养微生物主要有光合细菌、厌氧紫硫细菌等,以火星表面改造后的环境为生存环境目标,利用基因改造技术培育新的品种实现生物制氧。

更进一步,可以使用体型微小的藻类和真菌,在条件具备的时候,发展到利用更高级的植物完成制氧。

### 水

火星表面最廉价的水资源来自于极区的水和干冰混合物,可通过适应低温

环境的移动智能体,自主完成开采、运输、分馏过程。矿物开采的过程中,也会有结晶水析出。还需要发展废水处理技术,避免宝贵的水资源被浪费掉。野外工作时,可以利用 $\text{H}_2\text{O}_2$ 催化分解获得生命保障所必需的水。

### 光

光能是最主要的宜居化初始能源形式,为避免尘暴等因素的影响,最方便的方式是在轨道器上布置太阳能发电站,再以激光或微波的形式传输至火星表面。在火星表面,太阳能除用于发电外,还用于光合作用、照明、局部高温实现等用途。一种特殊的短时间获得光的方式是激光点燃的金属粉末在 $\text{CO}_2$ 环境下燃烧。

### 建筑材料

火星土壤可以作为建筑的材料,设想通过高温熔化,再用3D打印的方式实现建筑构造,利用硅土形成建筑构件,材质类似于玻璃,可以实现气密性。

火星土壤中含有丰富的盐类,包括碳酸盐、硫酸盐、氯化物等,利用不同成分的矿物,通过冶炼,可以生产出铝合金、铁合金、单晶硅等宜居化必需品。

### 食物

最主要的食物是藻类,其繁殖过程要求低,并可



▲ 火星表面示意图

以供应人类生存必需的营养物质, 逐渐发展到植物食物, 包括水稻、小麦等自花授粉粮食作物及各种蔬菜。为了避免口味的单一化, 使用各种风味丸进行调剂。

### 推进剂

最容易实现的本地化化学推进剂是液态的 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_2$ , 如果认为这种推进剂组合的比冲小, 还可以使用液态的 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 等, 获得方式为 $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{O}_2$ 。

另外, 在火星表面的短距离移动可使用电动车、气球作为运输工具, 远距离运输则可使用磁力炮和降落伞。

## 4 宜居化技术验证

俄罗斯、美国都已经开展了载人火星任务相关的技术验证工作, 例如俄罗斯的火星-500项目研究了火星飞行(长时间、高度自主、与地球通信状态改变——信号传输延迟、消耗品数量有限)过程中, 乘组长期隔离在狭小的正常压力环境下的“人-环境”系统, 并获取乘组人员的健康状况和工作能力的实验数据。

在地球上研究较多的火星类比点有智利的阿卡特玛沙漠实验站、北极斯瓦尔巴群岛火星类比点、南极干谷地区、犹他州火星沙漠实验站、西班牙里奥廷脱火星类比点、突尼斯吉利特盐湖区类比点和中国青藏高原大浪滩盐湖区火星类比点、青海大柴旦红崖地区等, 这些类比点研究项目的侧重点各不相同。

从成本考虑, 技术验证工作是渐进的, 首先是地基研究, 然后根据需要开展地球轨道、月球表面的验证试验, 最后在火星表面开展技术验证和确认。现阶段可以开展的技术研究与验证项目至少包括:

### 推进剂生产

尽可能利用火星 $\text{CO}_2$ 等资源, 实现推进剂的本地化生产, 是最急需开展的技术验证项目, 对载人火

星任务规模的简化具有重要的意义, 包括 $\text{CO}_2$ 分解为 $\text{CO}$ 和 $\text{O}_2$ , 以及利用 $\text{H}_2$ 和 $\text{CO}_2$ 生产 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ , 还包括产物的液化及长期贮存涉及的保温技术等。

这项技术完全可以在地面进行比较充分的验证, 缩小生产设备规模并降低复杂程度, 尽早进行火星表面原理性验证。

### 火星建筑构件的高温打印

利用火星表面的土壤, 结合构件打印技术, 验证能源利用效率高的建筑构件生产方法, 也是一项可以在地面进行验证, 在近期就可以安排火星表面技术验证的项目。技术的核心在于高温的实现方法、能源利用效率的提高、辐射防护效果确认、构件材料气密性研究。

### 火星移动智能体

在人类移民之前, 必定有大量的准备工作由机器人自主实现, 因此需要发展火星移动智能体, 利用这种适应恶劣环境的任务级智能系统, 完成早期的资源开采、运输、生产等活动, 为最终的移民做好准备。

### 生物制氧

利用基因技术, 筛选改造适应火星表面恶劣环境条件的厌氧生物, 在比较容易实现的改造环境下, 实现生物制氧的原理性验证。首先应在地球上构造类似于火星表面温度、气压、气体成分、土壤成分等因素的综合环境模拟舱, 完成微生物筛选、改性等工作, 开展生物制氧技术验证。

## 5 结束语

在火星表面构建适合人类生存的宜居环境是一项巨大的技术挑战。文章对火星宜居化涉及的水、氧气、推进剂、电能等资源的获得方法进行了展望性分析, 提出了关键技术早期技术验证的设想, 其中部分项目已经具备在火星表面开展原理性验证的可能性。