

火星探测用金属/CO₂ 燃烧技术研究进展与展望

王志琴¹, 李孟哲¹, 张津泽², 胡加明¹, 刘世宁¹, 郭宇¹, 胡春波¹

(1. 西北工业大学, 燃烧、热结构与内流场重点实验室, 西安 710072;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 火星原位资源利用指利用火星当地资源生产火星探测所需原料和能源, 减少任务载荷, 降低发射成本, 是火星探测不可或缺的关键技术。金属和二氧化碳是火星重要的原位资源, 部分金属可以在二氧化碳气氛中燃烧, 使得金属/CO₂ 燃烧体系在火星上扮演地球上化石燃料/空气燃烧体系的角色成为可能。从拓展金属/CO₂ 燃烧技术在火星探测中应用的角度出发, 梳理了火星二氧化碳收集方式、火星矿物分布和冶炼、金属/CO₂ 燃烧技术的主要应用方式 (Mg/CO₂ 火箭发动机和 Mg/CO₂ 金属燃烧器) 的研究进展, 并对今后的研究进行了展望。

关键词: 火星探测; 原位资源利用; 金属/CO₂ 燃烧

中图分类号: V11

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 05-0061-10

Research Progresses and Prospects of Metal/CO₂ Combustion Technology for Mars Exploration

WANG Zhiqin¹, LI Mengzhe¹, ZHANG Jinze², HU Jiaming¹, LIU Shining¹, GUO Yu¹, HU Chunbo¹

(1. Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In-situ resource utilization (ISRU) of Mars refers to the use of local resources of Mars to produce raw materials and energy needed for Mars exploration, to reduce mission load and launch costs, which is an indispensable key technology for Mars exploration. Metals and carbon dioxide are important in-situ resources on Mars. Some metals can be burned in carbon dioxide atmosphere, which makes it possible for metal/carbon dioxide combustion system to play the role of fossil fuel/air combustion system on Mars. From the point of view of expanding the application of metal/CO₂ combustion technology in Mars exploration, this paper reviews the research progress of Mars carbon dioxide collection mode, Mars mineral distribution and smelting, and the main application modes of metal/CO₂ combustion technology (Mg/CO₂ rocket engine and Mg/CO₂ metal burner), and prospects the future research.

Key words: Mars exploration; In-situ resource utilization; Metal/CO₂ combustion

收稿日期: 2019-06-01; 修订日期: 2019-08-07

基金项目: 载人航天领域预先研究项目 (050303)

作者简介: 王志琴 (1993-), 女, 硕士, 主要研究方向为航空宇航推进理论与工程。E-mail: xgdwzq0923@163.com

通信作者简介: 胡春波 (1966-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为航空宇航推进理论与工程。E-mail: huchunbo@nwpu.edu.cn

0 引言

随着社会的发展和文明的进步,人类渴望获得更广阔的活动空间,外太空探测是实现这一目标的主要手段。火星作为太阳系八大行星中与地球最为相似的星球,成为各航天大国深空探测任务的最主要目标之一。近年来,各国掀起火星探测的热潮,并公布了近十几年的研究计划,火星探测器逐渐增多,性能不断升级,任务形式也逐渐多样化,相应的火星探测载荷不断增大,探测成本不断提高^[1-2]。因此,国内外研究学者和专家提出开展原位资源利用技术(ISRU),利用火星当地资源,减少发射载荷和成本,扩大火星探测范围,延长火星表面停留时间^[3]。

火星当地大气资源和矿物是原位资源利用的主要研究对象。为了满足人类在火星上的正常活动,燃烧作为一种具有集中的、高功率的、相对简单的能量释放形式必不可少。火星大气主要成分为二氧化碳,但大气压强较低,无法采用与地球相似的方式直接参与燃烧,且二氧化碳仅可作为铝、镁等部分燃料的氧化剂实现燃烧反应。故深入研究金属/CO₂的燃烧体系对火星人类活动具有重要的意义与价值。

由于火星任务的活动范围和活动能力有限,现阶段火星矿物资源的研究以遥感和采样为主,人类仅对火星矿物组成和分布有初步的认识^[4-6]。本文将主要介绍火星二氧化碳收集技术、火星矿物分布和组成情况,以及火星金属/CO₂燃烧体系相关技术的研究进展和展望。

1 二氧化碳收集研究现状

火星大气是火星的重要资源,当前探测数据显示火星大气含有大量的二氧化碳(95.32%),少量的氮气(2.7%)和氩气(1.6%),微量的氧气、一氧化碳和水^[7]。在火星探测前期,由于水资源分布和开采方法还有待进一步探索,二氧化碳是生产推进剂最直接的原料,二氧化碳的利用方式主要有直接利用(如Mg/CO₂发动机)、固态氧化物电解、逆水-气转化反应、萨巴蒂尔反应以及综合利用。而实现这些利用方式的第一步都是从火星大气中收集二氧化碳,二氧化碳收集装置需要小型化、轻量化、高效率、尘土环境的高适应性、非二氧化碳气体的过滤能力,以及在火星

表面严酷的每日温度变化和季节性温度变化条件下稳定可靠运行500~600天的能力^[7]。目前采用的二氧化碳收集方式主要有:吸附泵法、低温冷凝法和机械压缩法。

1.1 吸附泵法

吸附泵法不需要可移动部件,通过交替加热和冷却吸附材料来实现压缩收集。吸附材料在低温时吸收低压气体,在高温时驱除高压气体。通过将吸附泵暴露在火星寒冷的夜间环境中,吸附材料优先将二氧化碳从火星大气中吸入。白天利用太阳能在密封的容器中将吸附有二氧化碳的材料加热,释放出几乎纯净的高压二氧化碳气体以供使用。吸附泵法收集二氧化碳的工作循环过程如图1所示,主要包括等容加热(A-B)、定压加热(B-C)、等容冷却(C-D)和定压冷却(D-A)过程^[8]。

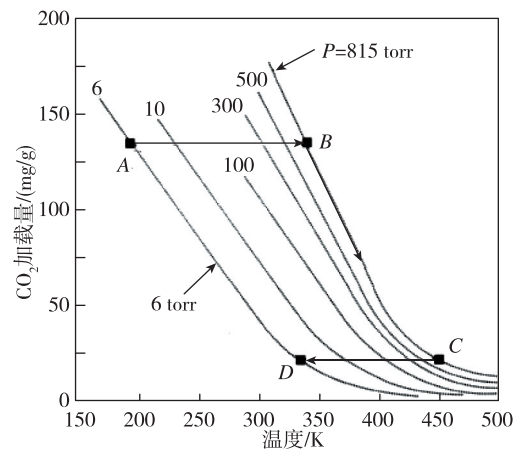


图1 吸附泵工作循环过程

Fig. 1 Mars adsorption compressor basic operating cycle

1997年Rapp等^[8]设计了一种火星二氧化碳吸附泵(见图2),并进行全尺寸实验。实验过程中采用13X沸石,气体从吸附剂中的净排放量大约为每克沸石0.11g的二氧化碳。实验装置内部容器含有一个放置沸石的网状设备,网状设备中的导热棒,在晚间将吸附床的热量传递到外部环境。通过真空夹层将吸附床和外部环境隔离,以减少加热过程中的热损失。火星大气从两端的入口进入,沿着中心软管流动,呈辐射状向外通过吸附床,并利用一个小风扇使得气体平缓地在装置中循环,从而阻止Ar和N₂等不吸收的惰性气体在装置中堆积。

Rapp最初用纯二氧化碳在该装置上进行实验,设备运行非常理想。进行了3次独立的测试,吸附

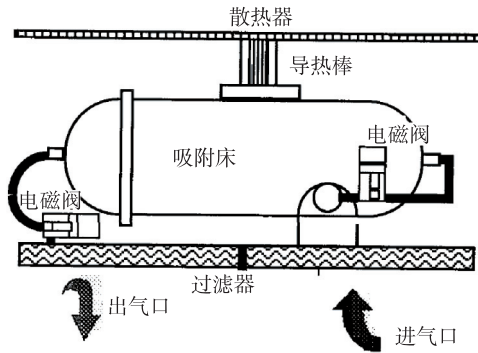


图 2 吸附泵装置

Fig. 2 Sorption pump assembly

床 (20.5kg 的 13X 沸石) 分别贮存 3.0kg、3.3kg 和 3.4kg 的二氧化碳, 贮存百分比分别为 14.6%、16.0% 和 16.6%。然而, 当该系统利用火星大气混合物进行测试时, 性能变得非常差, 吸附床的总能力减小到用纯二氧化碳的 1/3, 并且吸附量受到抑制。显然, Ar 和 N₂ 抑制了二氧化碳的吸收, 而风扇并没有起到对 Ar 和 N₂ 的吹除作用。

1.2 低温冷凝法

低温冷凝法是利用制冷机将冷冻腔的表面温度降到二氧化碳的凝固点以下, 使大气中的二氧化碳在冷冻腔中冷凝。当冷冻腔收集了一定体积的二氧化碳时, 制冷机关闭, 凝固的二氧化碳加热到与周围温度相同, 产生高压气体或者液态二氧化碳, 输送至储箱或直接用于下一步的化学反应系统^[7]。

2001 年, Trevathan 等^[9]率先设计了一套在火星大气压条件下冷凝收集二氧化碳的装置, 如图 3 所示。来流端由过滤器、鼓风机和控制阀组成; 核心部件为冷冻腔和制冷机; 输出端由两个控制阀组成, 一个用于控制出口流动, 另一个用于排出废气。过滤器用于清除火星大气中的粉尘等杂质。鼓风机用于将来流气体送入制冷装置, 防止残余的 N₂ 和 Ar 在冷冻腔中积累而影响二氧化碳的凝结性能。在实验过程中使用制冷机将换热表面的温度维持在 150K 左右。

Clark^[9]对凝固二氧化碳所需的能量进行了评估, 认为每天生产 3kg 的二氧化碳, 需要 2.6kWh (大约 400W 功率持续 6h)。实验发现, 利用火星相对温暖的环境很容易将固体二氧化碳转换为液体二氧化碳。

2010 年, Gully 等^[10]采用如图 4 所示的二氧化碳冷凝收集系统研究了制冷和加热循环过程对

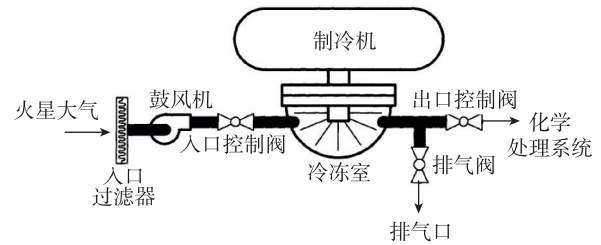


图 3 凝固二氧化碳收集装置

Fig. 3 Solidified CO₂ collection device

二氧化碳收集特性的影响。通过改进制冷和加热循环过程, 二氧化碳收集速率从 220g/3h 提升至 440g/3h, 可稳定生产压力为 5MPa, 流量为 10g/s 的二氧化碳。

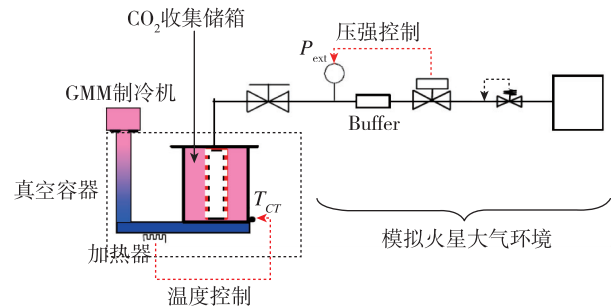


图 4 二氧化碳收集装置的原理图

Fig. 4 Principle diagram of CO₂ collection device

为了进一步改善二氧化碳收集装置性能, 后期的研究者在这一方案的基础上进行了一系列系统方案和装置结构的改进。2012 年, Muscatello 等^[11]研究了不同冷探头对二氧化碳收集效率的影响。使用如图 5 所示的小型实心铜柱时, 二氧化碳冷却时间为 4.5min, 1.25h 收集到了 78g 的二氧化碳, 收集的质量为设计要求的 71%。据此, 该团队又设计了新的冷探头, 结构如图 6 所示, 该冷探头最大限度地减小了铜的质量, 从而缩短了冷却时间, 提高了干冰收集的表面积。

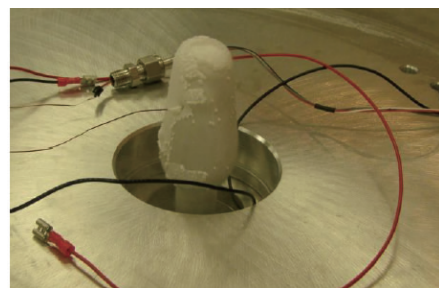


图 5 10mbar、150K 下收集的干冰二氧化碳

Fig. 5 Dry ice collected at 10mbar and 150K

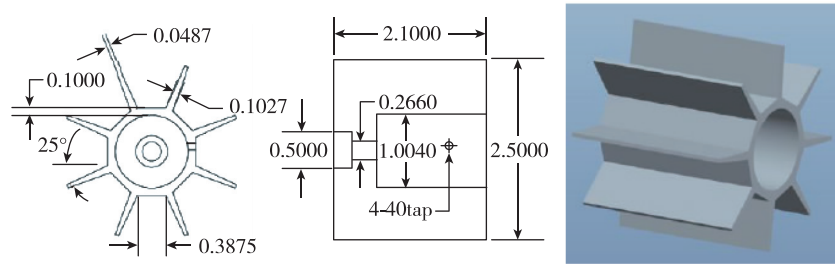


图6 铜冷探头图 (尺寸单位为英寸)

Fig. 6 Drawings of the new copper cold head (all units are in inches)

2018年, Shah等^[12]设计了火星表面二氧化碳收集装置, 并进行了在不同结构的冷探头下(见图7), 纯二氧化碳条件和火星大气条件二氧化碳的冷凝收集实验, 如图8和图9所示。结果表明, 音叉型(Turning Fork)的冷探头制冷效果最佳, 而火星大气条件下二氧化碳的收集速率均低于纯二氧化碳条件。

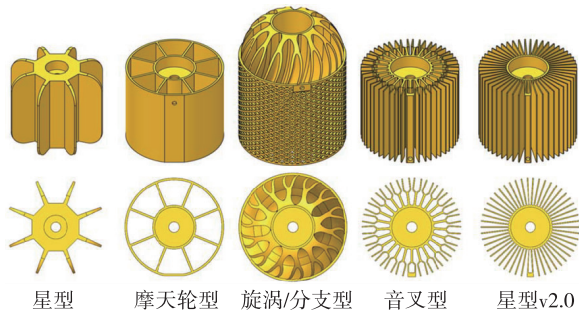


图7 实验中使用的冷探头结构

Fig. 7 Cold heads used in the experiments

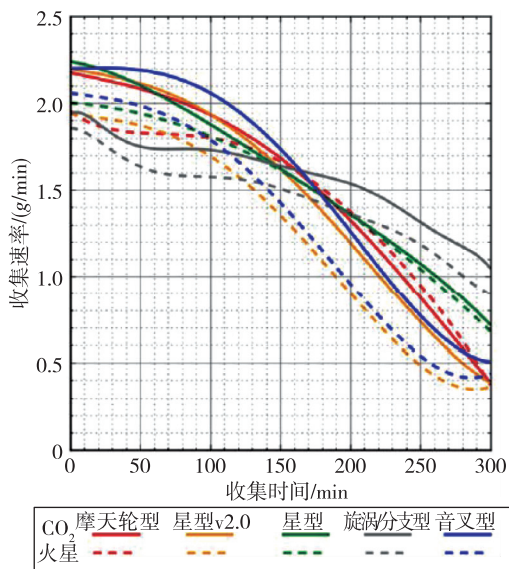


图8 不同气体、冷探头条件下二氧化碳收集速率对比
Fig. 8 Comparison of collection rate between cold heads for different gas conditions

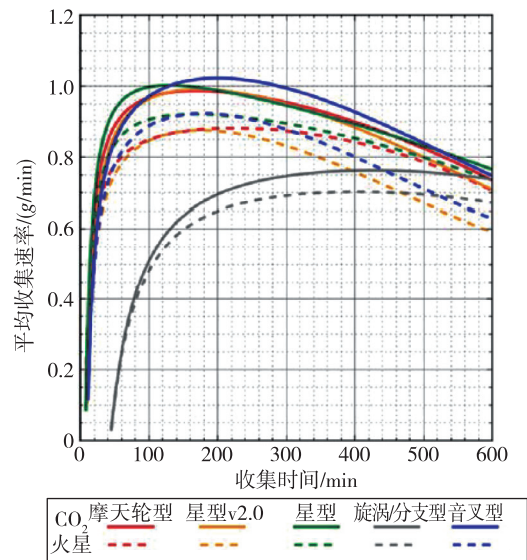


图9 不同气体、冷探头条件下二氧化碳平均收集速率随循环时间变化的曲线

Fig. 9 Average collection rate between cold heads for different gas conditions at varying cycle times

由以上研究可以看出, 冷探头对二氧化碳的收集具有很大的影响, 二氧化碳的凝固速率会随冷探头上已凝固的干冰的厚度的增加而减慢, 因而更高比表面积和更均匀气流分布的冷探头是低温冷凝法技术研究的重点^[13]。同时该方法也被设计用于NASA的MARCO POLO火星登陆项目。

1.3 机械压缩法

2015年, Rapp等^[14]对比分析了低温冷凝法(见图10)和机械压缩法(见图11)对二氧化碳收集效率的影响, 验证了采用机械压缩方式进行气体二氧化碳收集的可行性。实验结果发现当采用低温冷凝法时, 制冷机的功率为1.2W_{th}时, 二氧化碳的收集速率便达到6.6g/h, 收集46g二氧化碳需7h; 采用机械压缩法时, 只需30min可收集到46g的二氧化碳。

在现有的压缩技术中, 涡旋泵(或等效的压

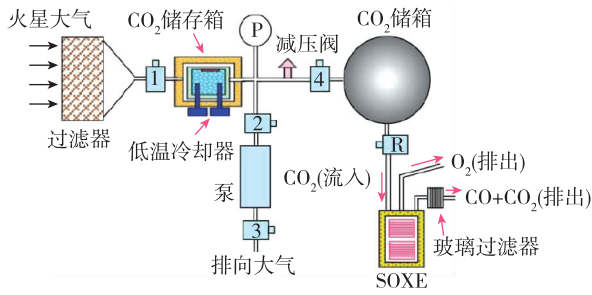


图 10 二氧化碳压缩收集流动路径图

Fig. 10 MOXIE gas flow path with cryogenic CO₂ accumulation and compression

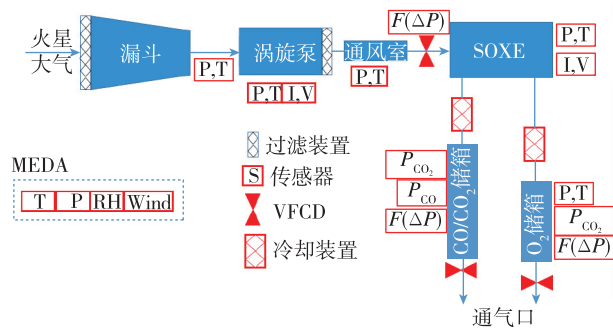


图 11 机械压缩机系统

Fig. 11 Mechanical compressor system

缩机) 被确定为该应用中机械性能最坚固、最成熟、最容易实现轻量化的方式。美国的 Air Squared 公司正在研究的涡旋压缩机采用图 12 所述的传统涡旋泵设计, 该泵质量小于 2kg, 预计在额定火星条件下输送超过 100g/h 的火星空气。

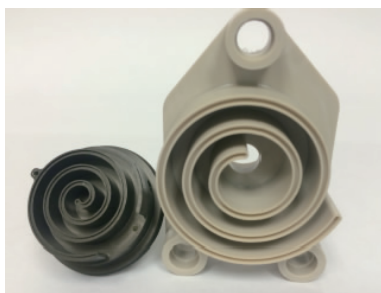


图 12 传统涡旋泵结构图

Fig. 12 Conventional scroll pump

通过以上研究成果可以发现, 采用吸附泵法收集火星大气中的二氧化碳时, Ar 和 N₂ 会抑制二氧化碳的吸收, 使得二氧化碳的吸附量较小, 并且该装置体积较大, 故其可行性较差; 采用低温冷凝法收集时, 冷探头对二氧化碳的收集具有很大的影响, 该方法可实现液体二氧化碳的收集

和储存, 装置体积相对较小; 采用机械压缩法时使用压缩机将大气中的二氧化碳压缩至 1bar 左右, 直接用于萨巴蒂尔反应系统, 压缩速率高于低温冷凝法。

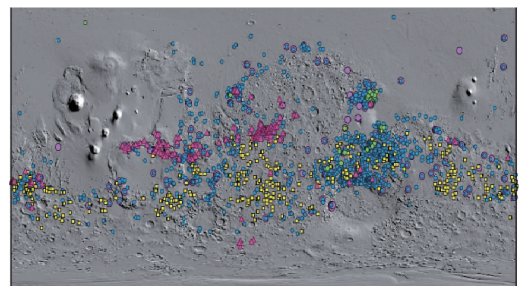
2 火星矿物研究现状

2.1 火星矿物分布和组成

1987 年, Pollack 等^[15]根据地表的岩石的化学特性以及地面模型得出火星上可能存在的碳酸盐矿物, 包括方解石、白云石、菱铁矿和菱镁矿, 占分化层的 1.5%。此后, 许多研究者对火星上碳酸盐的成分进行了研究, 但由于不同研究者选取的火星土壤位置不同, 得出的成分及其比例存在一定的差异。

2013 年, Bishop 等^[16]采用反射光谱法、X 射线衍射、穆斯堡尔谱学 3 种方法对菱镁矿、绿脱石以及硅酸镁石进行了分析。研究表明, 穆斯堡尔谱学可以用于火星上含 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 矿物的评估, 但不适合对菱镁矿的分析; 反射光谱法较难检测到混合物中绿脱石, 菱镁矿和硅酸镁石的光谱特征较明显; 菱镁矿和硅酸镁石的 X 射线衍射谱的全谱拟合分析与混合物实际值相关性较强, 同时火星上碳酸盐中的硅酸盐矿物较容易用化学试剂检测到。该研究为火星上碳酸盐成分的测定提供了重要的依据。

2016 年, Abbud-Madrid 等^[17]给出了火星所有矿物探测的总编, 包括层状硅酸盐、水合硅土、氯盐、碳酸盐以及硫酸盐, 如图 13 所示。



●层状硅酸盐 ●水合硅土 ●氯盐 ●碳酸盐 ●硫酸盐

图 13 火星所有矿物探测的总编

Fig. 13 Global distribution of the major classes of aqueous minerals on Martian surface

2018 年, Robinson 等^[18]给出了火星土壤不同位置处矿物的成分及比例, 如表 1 所示, 其中 Tarmac 为第一表层土壤处的土壤样本, Hema2 为

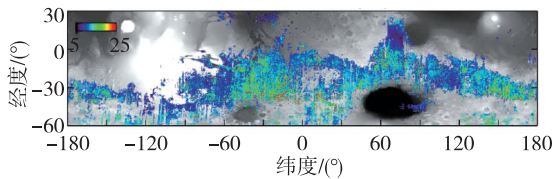
赤铁矿边缘处的土壤样本, Les Hauches 为勃朗峰的土壤样本。由表 1 可以看出, 火星土壤与地球、月球以及其他小行星有许多相同的成分, 这表明地球上许多适用的矿业开采方法适用于火星。

表 1 火星土壤主要成分

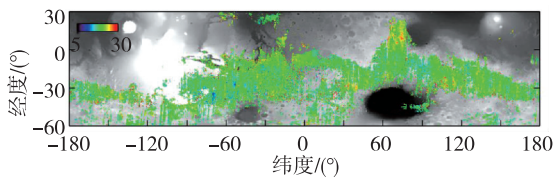
Tab. 1 Major components of Martian soil

土壤	Tarmac	Hema2	Les Hauches
SiO ₂	45.5%	41.9%	44.7%
Al ₂ O ₃	8.8%	8.1%	8.8%
MgO	7.2%	7.0%	7.2%
CaO	7.52%	6.27%	6.82%
K ₂ O	0.48%	0.43%	0.48%
TiO ₂	1.09%	0.83%	1.07%
SO ₃	4.68%	4.68%	7.29%
FeO	20.1%	26.5%	19.0%
Na ₂ O	1.4%	1.6%	1.7%
P ₂ O ₅	0.82%	0.83%	0.94%
Cr ₂ O ₃	0.52%	0.37%	0.37%
(K, Na, Mg) ClO ₄	0.43%	0.46%	0.54%
MnO	0.4%	0.32%	0.37%

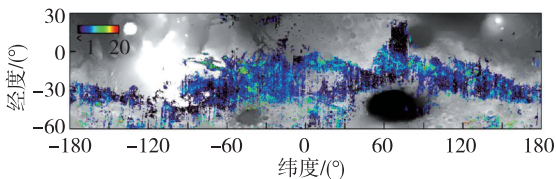
2019年, Riu 等^[19]通过将辐射传输模型运用到再现数百万 OMEGA 光谱结果, 得到火星 60°S 至 30°N 之间的部分矿物丰度图 (见图 14), 并给出了可以作为参考的各矿物化学成分, 如表 2 所示。



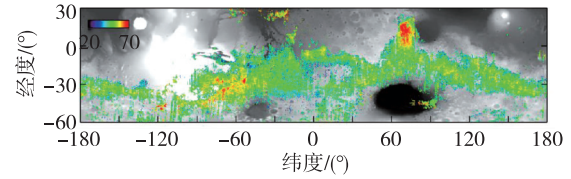
(a) 低钙辉石 (体积分数%)



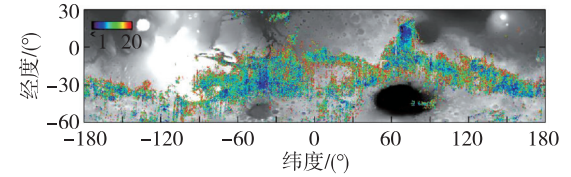
(b) 高钙辉石 (体积分数%)



(c) 富镁橄榄石 (体积分数%)



(d) 斜长石 (体积分数%)



(e) 尘土 (体积分数%)

图 14 火星部分矿物资源 60°S 至 30°N 空间丰度分布图

Fig. 14 Spatial distribution of abundance between 60°S to 30°N

表 2 矿物组分参考 (质量分数%)

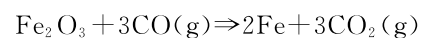
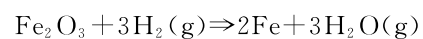
Tab. 2 Ore composition reference (mass fraction)

	尘土	高钙辉石	低钙辉石	斜长石	橄榄石
SiO ₂	43.7	50.35	49.99	51.76	40.87
TiO ₂	3.8	0.35	0.53	0	0
Al ₂ O ₃	23.4	2.21	6.21	30.84	0
FeO	3.5	16.18	16.56	0	9.77
Fe ₂ O ₃	11.8	1.69	0.58	0	0
MnO	0.3	0.37	0.26	0	0
MgO	3.4	11.1	22.31	0	49.36
CaO	6.2	17.93	3.99	13.36	0
K ₂ O	0.6	0.03	0	0.17	0
Na ₂ O	2.4	0.23	0.06	3.86	0

由以上分析可知, 火星上铁、镁、铝等资源均有一定丰度, 在火星表面部分地区明显有较高储量, 具有开采价值, 这为将来的火星矿物冶炼提供了基础。

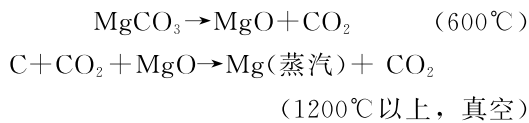
2.2 火星矿物冶炼

1993年, Stoker 等^[20]指出在地球和火星上, 金属加工的化学和热力学约束是相同的。金属铁和铜, 比其他常见金属如铝或镁更容易从氧化物或其他化合物中还原。因此, 相对简单的化学方法可以用来回收铁。铁的氧化物主要集中于火星土壤或者矿物中, 当获得了铁的氧化物后通过以下化学反应可以还原出铁:



前者反应式中的 H₂ 可通过水的电解得到, 后者反应式中的 CO 可以通过火星大气获得。

地球上金属镁 (和金属铝) 冶炼的方法主要有电解法和碳热法。电解法的原理是在高温下电解熔融的无水氯化镁, 使之分解为金属镁和氯气。在氯元素和电能足够时, 电解法冶炼金属镁也是可能的。碳热法的工作原理^[21]是在高温和真空条件下, 利用碳从菱镁矿中提炼得到金属镁蒸汽, 通过快速冷凝即可得到条状金属镁。从工作原理上, 碳热法用于镁/二氧化碳燃烧产物中冶炼金属镁是可能的, 然而受相关因素限制, 目前金属镁的火星原位冶炼技术还未见报道, 但与地球上冶炼原理基本相同。



3 金属/CO₂ 燃烧技术研究现状

3.1 金属燃料选择

1993 年, Shafirovich 等^[22]以火箭发动机为背景, 分析了不同金属以及硼、硅与二氧化碳反应的比冲, 结果如图 15 所示。镁、铝、铍、硼均有较高比冲, 但铍有毒性, 铝、锂、硼在二氧化碳气氛中点火性能差, 燃烧速率低, 故镁是金属/CO₂ 燃烧方式中金属燃料的最佳选择。

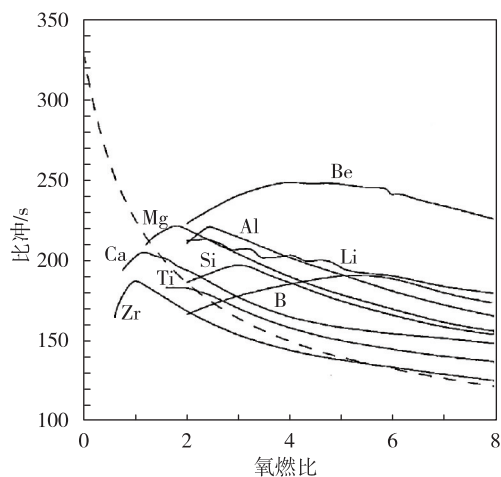


图 15 以二氧化碳为氧化剂, 金属为燃料的火箭发动机比冲随氧燃比的变化曲线

Fig. 15 Specific impulse of a rocket engine using CO₂ as an oxidizer and metals as fuel vs oxidizer-fuel mass ratio

3.2 Mg/CO₂ 燃烧技术进展

Mg/CO₂ 燃烧の利用方式主要有 Mg/CO₂ 火箭发动机和 Mg/CO₂ 金属燃烧器。Mg/CO₂ 燃烧时燃料一般为镁粉, 根据应用要求的不同, 氧化剂可以选为气态或者液态的二氧化碳。燃料 Mg 粉经二氧化碳气体流化在喷注器出口形成稠密气固两相射流, 在气体扩散和湍流的影响下, 镁粉在燃烧室头部中逐渐离散开。液体二氧化碳通过喷嘴展开成一定厚度的液膜, 进而雾化成细小的液滴。蒸发产生的气体二氧化碳在浓度梯度的作用下扩散至稠密颗粒区, 发生气固掺混, 形成气固两相混合物。当气固两相流流经点火器的局部高温区时, Mg 颗粒开始预热升温。颗粒温度上升至着火点附近, 颗粒开始蒸发产生 Mg 蒸气, 与周围环境中的二氧化碳进行气相掺混和燃烧。

3.2.1 Mg/CO₂ 火箭发动机

Mg/CO₂ 火箭发动机是在 20 世纪 70~80 年代深空探测热潮背景下提出的, 其中液体二氧化碳可以从火星大气中收集, 镁粉在火星探测早期从地球携带, 在后期由火星当地生产。与其他推进方式相比, 在火星环境下工作具有较强的优势, 可用于火星表面飞行器动力系统、火星表面-轨道返回动力系统以及火星车等动力系统, 具有深远的应用价值和发展空间。相关探测器的构想如图 16 和图 17 所示。在早期, 采用 Mg/CO₂ 火箭发动机可以减少火箭的返程推进剂携带量, 从而减小火箭发射载荷, 降低火箭发射成本; 在后期, 可以实现推进剂完全由火星当地生产。

Mg/CO₂ 火箭发动机与其他粉末火箭发动机原理基本相同, 主要可以分为供粉系统和燃烧组织系统两部分。国内外针对 Mg/CO₂ 发动机进行了大量的研究。

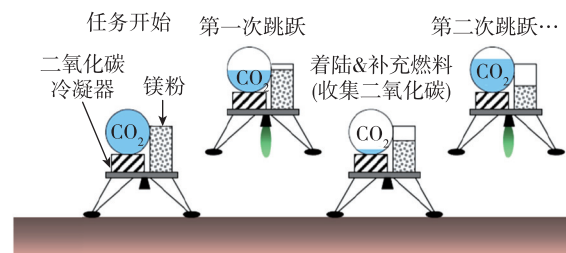


图 16 跳跃式飞行器^[23]

Fig. 16 Jumping Aircraft^[23]



图 17 升降飞行器^[24]

Fig. 17 Lifting Vehicle^[24]

1999年, 韦克曼公司的 Wickman 等^[25]对火箭式和涡轮式的 Mg/CO₂ 发动机进行了实验, 如图 18 所示, 两者均采用重力和储箱增压的方式进行粉末供给。其中涡轮式发动机由于叶片积碳停止运作; 火箭式发动机成功工作, 测得燃烧室压强为 1MPa, 工作时间为 3s, 推力为 180N。

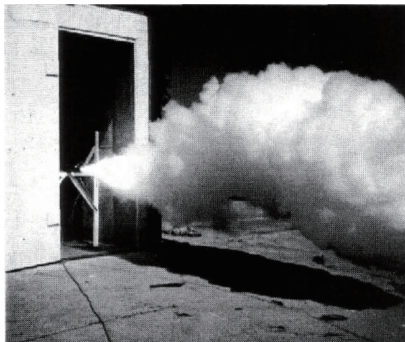


图 18 火箭式 Mg/CO₂ 火箭发动机点火工作

Fig. 18 Ignition operation of Mg/CO₂ rocket engine

2005年, 马歇尔中心的 Foote 等^[26]对 Mg/CO₂ 发动机进行了常压燃烧实验, 采用正向位移流化床式供粉, 如图 19 所示。



图 19 Mg/CO₂ 常压燃烧器

Fig. 19 Mg/CO₂ atmospheric burner

2011年, 宾州州立应用实验室的 Szabo 等^[27]搭建了 Mg/CO₂ 发动机的实验样机, 如图 20 所示, 采用气压驱动, 燃烧室压强达到 2.4MPa, 工作时间为 42.5s, 平均推力最大可达 53N。

国内西北工业大学胡春波等^[28-33]对 Mg/CO₂ 火箭发动机进行了深入研究, 如图 21 所示, 实现

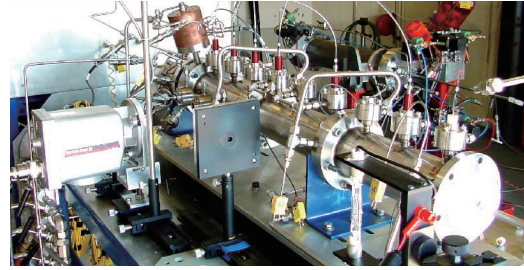


图 20 Mg/CO₂ 火箭发动机样机

Fig. 20 Mg/CO₂ rocket engine prototype

了 Mg/CO₂ 火箭发动机稳定点火燃烧、推力调节、热启动条件下的多脉冲功能, 并对供粉、燃烧组织等问题进行了系统的研究。

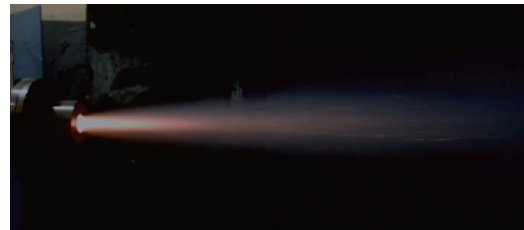


图 21 Mg/CO₂ 火箭发动机实验

Fig. 21 Mg/CO₂ rocket engine experiment

3.2.2 Mg/CO₂ 金属燃烧器

镁粉在火星上可以扮演地球上煤的角色, 通过采用镁/二氧化碳金属粉末燃烧器的形式, 可用于采冰车、采矿车、电站和地面人员取暖等需要集中高功率放能的场合, 如图 22 所示。

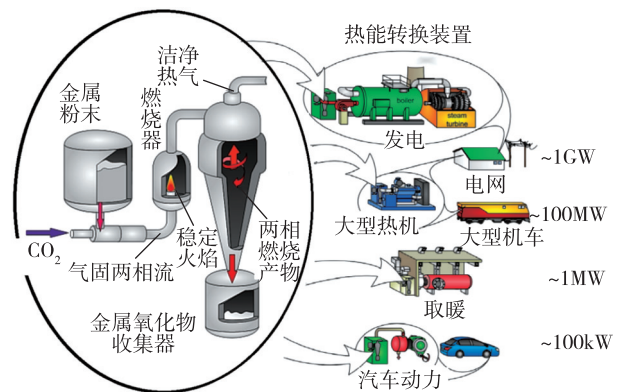


图 22 镁/二氧化碳金属粉末燃烧器应用方向^[34]

Fig. 22 Applications of Mg/Carbon dioxide metal powder combustor^[34]

2015年, Bergthorson 等^[34]提出了金属燃烧器的概念, 分析了金属燃烧器的原理和应用模式。该系统包括金属燃料供给系统、燃烧室以及凝相产物

- nautics Forum and Exposition, 2018; 5173.
- [13] 李梦竹, 张登攀, 蒋榕培, 等. 火星液氧/甲烷推进剂原位制备技术研究进展 [J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (3): 59-70.
- [14] Rapp D, Hoffman J A, Meycn F, et al. The Mars Oxygen Isru Experiment (MOXIE) on the Mars 2020 rover [C]. AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition, 2015: 4561.
- [15] Pollack J B, Kasting J F, Richardson S M, et al. The case for a wet, warm climate on early Mars [J]. Icarus, 1987, 71 (2): 203-224.
- [16] Bishop J L, Perry K A, Dyar M D, et al. Coordinated spectral and XRD analyses of magnesite-ntronite-forsterite mixtures and implications for carbonates on Mars [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2013, 118 (4): 635-650.
- [17] Abbud-Madrid A, Beaty D, Boucher D, et al. Mars water in-situ resource utilization (ISRU) planning (M-WIP) study [J]. Report of the Mars Water In-Situ Resource Utilization (ISRU) Planning (M-WIP) Study, 2016, 90.
- [18] Robinson J W, Morrison C. ISRU propulsion architectures for space travel beyond earth orbit [C]. 2018 Joint Propulsion Conference, 2018: 4705.
- [19] Riu L, Poulet F, Bibring J P, et al. The M3 project: 2-Global distributions of mafic mineral abundances on Mars [J]. Icarus, 2019, 322: 31-53.
- [20] Stoker C R, Gooding J L, Roush T, et al. The physical and chemical properties and resource potential of Martian surface soils [J]. Resources of Near-Earth Space, 1993: 659-707.
- [21] 刘海, 田阳, 杨斌, 等. 真空碳热氧化镁制备金属镁过程的可逆反应对金属镁冷凝的影响 [C]. 沈阳: 第十二届国际真空冶金与表面工程学术会议, 2015.
- [22] Shafirovich E I, Shiriaev A, Goldshleger U I. Magnesium and carbon dioxide-A rocket propellant for Mars missions [J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9 (2): 197-203.
- [23] Szabo J, Miller T, Herr J, et al. Metal bipropellant rockets for martian ascent vehicles [C]. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 2011, 2011.
- [24] 卡拉杰耶夫. 载人火星探测 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [25] Wickman J. In-situ Mars rocket and jet engines burning carbon dioxide [C]. 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1999: 2409.
- [26] Foote J, Litchford R. Powdered magnesium-carbon dioxide combustion for Mars propulsion [C]. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005: 4469.
- [27] Szabo J, Miller T, Herr J, et al. Magnesium bipropellant rockets for Martian ascent vehicles [C]. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011: 5834.
- [28] 李芳, 胡春波, 何国强. Mg粉/CO₂粉末火箭发动机性能分析 [J]. 固体火箭技术, 2010, 33 (4): 414-418.
- [29] 李芳, 胡春波, 何国强, 等. Mg粉/CO₂点火燃烧性能实验研究 [J]. 固体火箭技术, 2011, 34 (2): 193-196.
- [30] 姚亮, 胡春波, 肖虎亮, 等. Mg粉/CO₂粉末火箭发动机点火试验研究 [J]. 固体火箭技术, 2011, 34 (4): 440-442.
- [31] Zhang S M, Hu C B, Xia S Y, et al. Ignition and combustion of magnesium particles in carbon dioxide [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 152-154: 220-225.
- [32] Li C, Hu C B, Zhu X F, et al. Experimental study on the thrust modulation performance of powdered magnesium and CO₂ bipropellant engine [J]. Acta Astronautica, 2018, 147: 403-411.
- [33] 朱小飞, 胡春波, 胡加明, 等. 氧化剂气量配比对Mg/CO₂发动机性能影响实验 [J]. 航空动力学报, 34 (2): 479-485.
- [34] Bergthorson J M, Goroshin S, Soo M J, et al. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power [J]. Applied Energy, 2015, 160: 368-382.
- [35] Schiemann M, Bergthorson J M, Taroata D, et al. Re-utilizing carbon dioxide in metal combustion processes [C]. 43rd International Technical Conference on Clean Energy 2018, 2018.

引用格式: 王志琴, 李孟哲, 张津泽, 等. 火星探测用金属/CO₂燃烧技术研究进展与展望[J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (5): 61-70.

Citation: Wang Z Q, Li M Z, Zhang J Z, et al. Research progresses and prospects of metal/CO₂ combustion technology for Mars exploration [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (5): 61-70.