

WANG Hujun, CHU Yingzhi, ZHANG Xiao, LIU Yi, XU Hang, ZHONG Yubin, LIU Weixin. Research Progress on Long-lived Survival Technology of Venus Lander (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(6): 1492–1505. CSTR:32142.14.cjss.2024-0178. DOI:10.11728/cjss2025.06.2024-0178

金星着陆器长寿命生存技术研究进展*

王虎军¹ 褚英志^{1,2} 张晓^{1,2} 刘毅¹
徐航¹ 钟宇彬¹ 刘维新¹

1(深空探测实验室 合肥 230026)

2(上海卫星工程研究所 上海 201109)

摘要 金星是类地行星的重要组成部分, 金星的探测和研究对于理解行星的形成与演化、地球的宜居性及寻找系外宜居行星等具有重要的科学意义. 近年来, 欧洲及美、俄、印等国均计划在 2030 年前后开展新的金星探测任务. 金星表面高温、高压和腐蚀性的极端环境限制了人类对其的原位探索. 面向未来金星表面长时间探测的需求, 本文根据金星环境特点分析了着陆器长寿命生存面临的挑战, 从轻质抗高压结构设计、耐高温电子设备、能源系统和热控技术四个方面梳理了金星着陆器长寿命生存技术的研究进展, 给出了金星着陆器的设计建议, 为未来中国可能开展的金星着陆探测提供了参考.

关键词 着陆器, 长寿命生存, 高温电子设备, 能源系统, 热控

中图分类号 V476.4

Research Progress on Long-lived Survival Technology of Venus Lander

WANG Hujun¹ CHU Yingzhi^{1,2} ZHANG Xiao^{1,2} LIU Yi¹
XU Hang¹ ZHONG Yubin¹ LIU Weixin¹

1(Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230026)

2(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109)

Abstract Venus, as a major component of terrestrial planets, is of great scientific significance for exploration and research. Understanding Venus can enhance our knowledge of the formation and evolution of terrestrial planets, the development of Earth's habitability, and the strategies for searching habitable exoplanets. Recently, Venus exploration has witnessed a resurgence, with Europe, the US, Russia, and India planning new missions around 2030. However, its infernal surface conditions, a scorching 462°C, crushing 9.3 MPa pressure (equivalent to 900 m underwater on Earth), and corrosive CO₂ atmosphere laden with sulfuric acid aerosols, which have limited prior missions to mere hours of operation, exempli-

* 深空探测实验室前沿科研计划项目资助 (GC07JX0001ZC3ZT-2326)

2024-12-03 收到原稿, 2025-03-21 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

fied by the Soviet Venera 13's 127-minute survival record. To address the need for long-duration Venus surface missions, this paper analyzes the challenges of lander long-life survival based on Venus's environment, *i.e.*, energy acquisition and environmental adaptation. It reviews the research progress in four areas: lightweight pressure-resistant structures, high-temperature electronics, power systems, and thermal control technology, while offering design recommendations. Lightweight pressure-resistant structures, represented by honeycomb structures, lattice structures, and composite materials, show promise in effectively reducing the lander's weight while maintaining structural integrity. High-temperature electronics, based on materials like Silicon Carbide (SiC), can significantly enhance the performance and service life of electronic devices in extreme heat. Efficient energy systems, including radioisotope Stirling generators and high-temperature batteries, are expected to supply stable power to the lander and lessen the energy system's demand on thermal control resources. In terms of thermal control technology, building on high-performance heat storage and insulation materials, employing high-temperature Stirling cooling or compression cooling techniques can effectively tackle the heat dissipation issues for landers in high-temperature settings. The design recommendations outlined in this paper aim to provide valuable references for potential future Venus lander exploration missions, aiding in the development of more advanced and durable lander systems capable of withstanding Venus's challenging environment for extended periods.

Key words Lander, Long-lived survival, High temperature electronics, Power system, Thermal control

0 引言

金星的体积和质量与地球十分相近, 又被称为地球的“姊妹星”。科学研究表明, 在 30 亿年前, 金星可能有着与地球类似的初始组成, 长时间的演化形成了现在的状态。因此, 从行星比较学的角度, 金星的探测和研究为解答类地行星的形成与演化、地球宜居性的形成和发展以及外星系宜居星球搜索策略提供了重要的参考^[1]。

金星是人类深空探测活动的重点目标之一, 也是人类深空探测的第一站 (1962 年美国水手 2 号飞越金星)。金星的主要探测任务集中在 20 世纪 60—80 年代, 随后进入了持续的低谷期。近年来, 金星探测重回大众视线。2005 年美国宇航局发起了金星探测分析小组 (VEXAG), 长期开展金星探测战略规划研究。2021 年美国宇航局批准了新的金星探测项目真理号 (VERITAS)^[2] 和达芬奇+号 (DAVINCI+) 任务, 美国国家科学院发布的《起源、世界和生命: 2023—2032 年行星科学和天体生物学十年战略》中将金星原位探测列为优选中型任务之一, 欧空局计划在 2030 年前后开展展望号 (EnVision)^[3] 金星探测任务。俄罗斯也计划开展金星 D (Venera-D) 探测任务^[4]。金星的探测与研究即将进入崭新的阶段。着陆探测是认识金星、

了解金星最直接和最有效的手段。相比于传统的近地空间航天器、月球和火星探测器, 金星着陆器面临的环境更恶劣、更复杂。受金星极端高温高压环境的影响, 历史上成功着陆金星的着陆器寿命都很短, 最长生存时间仅为 127 min (苏联 Venera 13), 仅能开展短时探测, 难以获得金星表面详细的物质组成、大气与地表的相互作用和地震及火山的活动情况等信息, 无法对金星表面和内部结构、当前的活动性质和演化开展深入的研究。2019 年金星探测分析小组发布了“金星探测目标、目的和研究活动”“金星探测路线图”“金星技术计划”三份报告^[5], 其中“金星探测路线图”提出为满足科学探测的需求, 中远期金星探测活动中, 着陆器的工作寿命应能达到 1 个地球日和 1~2 个金星日 (1 个金星日约 116 个地球日)^[6]。俄罗斯的金星-D 任务也计划开发可在金星表面存活 30 天的着陆器^[5]。

金星探测即将迎来新的热潮, 金星也是中国开展深空探测过程中挑战和机遇并存的重要目标。面向未来金星表面长时间探测的需求, 本文结合金星环境特点, 分析了金星着陆器长寿命生存面临的困难, 从抗高压结构设计、高温电子设备、能源系统和热控技术四个方面汇总了长寿命生存技术的最新进展, 为未来中国可能开展的金星着陆探测提供了参考。

1 金星着陆探测任务

1961 年苏联发射了人类首颗金星探测器, 掀起了长达 20 年的金星探测高潮^[7-9]. 迄今为止, 人类通过飞掠、环绕和着陆等方式共开展了 43 次金星探测任务, 其中已开展了 15 次着陆探测, 成功率约为 73%, 成功着陆的金星着陆器相关概况列于表 1.

苏联通过 Venera 3~6 号着陆器开展了人类最早期的金星着陆尝试, 着陆器虽然采取了压力容器的结构设计, 并逐渐提升耐压能力, 但由于对金星表面极端高温高压环境的预测不足, 着陆器在下降过程中就失联了, 未能成功着陆. Venera 7 着陆器将压力容器材料由铝合金改为钛合金, 提升了其结构耐高温高压的能力, 首次实现了金星着陆探测, 受金星表面高温环境的影响, 着陆器仅工作了 23 min. 为了提升着陆器的寿命, 苏联开展了多项优化设计, Venera 8 着陆器采用相变蓄热技术^[7], 选用三水合硝酸锂作为相变材料, 同时采用着陆前预冷, 提升了系统热容量, 使着陆器的工作时长达到了 Venera 7 的两倍; Venera 11 和 12 探测器在此基础上采用了新型隔热材料高温聚氨酯泡沫 KG-25 和一种蜂窝复合材料 PTLV-260, 进一步提升了系统的热控性能, 使着陆器的工作时长达到了 Venera 8 的两倍.

1978 年美国发射了 Pioneer Venus 2 号探测器^[8], 携带了多个小探测器, 开展金星下降和着陆探测. 小探测器采用了以蓄电池 (AgZn 电池) 为能源核心、以

钛合金压力容器为主体抗高压结构、以隔热和储热为主要热控措施的设计方案, 最终有两个小探测器成功着陆, 其中一个探测器工作了约 67 min.

2 金星环境特点与影响

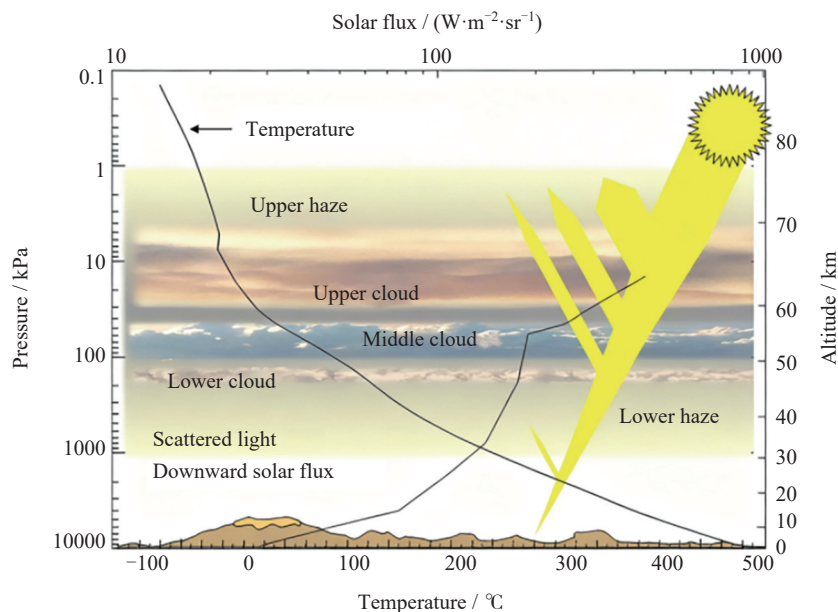
2.1 金星环境特点

迄今为止, 仅金星 (Venera) 系列着陆任务、Vega 1/2 号和 Pioneer Venus 2 号开展了短时金星着陆探测. 探测结果表明, 金星表面覆盖着稠密的大气层^[10], 大气结构、温度和压力如图 1 所示^[11]. 随着海拔高度的降低, 金星大气温度和压力均越来越高, 能接收到的太阳辐照越来越小. 金星大气主要由 96.5% CO₂, 3.5% N₂ 和其他微量气体 (例如 SO₂, 水蒸气, CO, HCl, He 和 Ar) 组成. 金星的环境呈现以下三大特点.

(1) 极端高温. 金星大气层中大量的二氧化碳、水蒸气和二氧化硫等气体造成金星表面剧烈的温室效应, 吸收了大量来自太阳的辐射能, 使其表面最高温度超过 470℃, 高于其他的太阳系行星, 甚至高于接受太阳辐射能是其四倍的水星 (最高温度约为 700 K, 427℃). 金星表面的平均温度高于铅 (约为 600 K, 327℃)、锡 (约为 505 K, 232℃)、锌 (约为 693 K, 420℃) 等金属的熔点. 另外, 由于大气和云层结构的影响, 金星表面的太阳辐照从上方的 2622 W·m⁻² 降低到地表的 100 W·m⁻² ^[12], 这使太阳辐照对金星表面温度的影响非常小, 导致其昼夜温度几乎不变^[13,14].

表 1 金星着陆器概况^[9]
Table 1 Overview of the Venus lander

序号	着陆器名称	着陆日期	着陆点坐标	着陆点温度/℃	着陆点压力/MPa	工作时长/min
1	Venera 7	1970-08-17	5°N, 351°E	475	9.2	23
2	Venera 8	1972-07-22	10.70°S, 335.25°E	470	9.0	50
3	Venera 9	1975-08-22	31.01°N, 291.64°E	455	8.5	53
4	Venera 10	1975-08-25	15.42°N, 291.51°E	464	9.1	65
5	Venera 11	1978-12-25	14°N, 299°E	452	9.26	95
6	Venera 12	1978-12-21	7°N, 294°E	468	9.36	110
7	Venera 13	1982-01-03	7.55°S, 303.69°E	457	8.9	127
8	Venera 14	1982-03-05	13.05°S, 310.19°E	470	9.4	57
9	Vega 1	1985-06-11	8.10°N, 175.85°E	467	9.5	56
10	Vega 2	1985-06-15	7.14°S, 117.67°E	463	9.1	56
11	Pioneer Venus 2	1978-12-09	32°N, 318°E (day)	约459	约9.45	67

图 1 金星大气^[11]Fig. 1 Venus atmosphere^[11]

如此极端的高温远高于现有电子设备的工作温度(现有电子设备中的硅半导体在约 300℃ 时将呈现导体特性),常规的主动制冷设备和太阳能发电装置也无法直接在这种极端环境下正常工作。

(2) 极端高压. 金星大气层中含有 96% 的二氧化碳,大气密度约为 $67 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,是地球大气密度的约 50 倍.金星表面大气压力超过了 90 个标准大气压(约相当于地球海洋深 1 km 处的压力)。

(3) 云层酸性环境. 金星大气中硫氧化物等酸性组分凝结成酸性液体,形成金星酸雨.但金星的硫酸雨无法到达金星表面,在到达表面以前会受热蒸发^[15].Krasnopolsky 等^[16]构建了金星大气模型,分析了金星大气中 H_2O 和 H_2SO_4 的垂直分布和浓度变化,结果表明,在 45~75 km 的范围内, H_2SO_4 的浓度可达到 73%~98%。

2.2 金星极端环境带来的挑战

金星的极端环境给着陆器的长寿命生存带来巨大挑战,主要体现在能源和环境适应性两方面.传统的航天器通常采用太阳能光伏发电为系统提供电能,但金星的大气层吸收了大部分的太阳辐照,投射到金星表面的太阳辐照能量密度很低,导致传统的太阳能光伏发电在金星表面的发电能力急剧下降^[17-19],着陆器长寿命生存所需的能源成为必须要解决的重大问题^[14,20,21].环境适应性是影响着陆器长寿命生存的另一

一个重要因素,主要包括高温、高压和腐蚀性.金星极端高温的环境一方面会给着陆器带来非常大的外热流,导致着陆器迅速升温;另一方面,现有电子设备的工作温度远低于金星环境温度,给主动制冷技术带来了巨大的挑战.常规的电子设备无法在 9200 kPa 的环境压力下正常工作,高压会导致空气的绝缘性显著下降,同时可能导致元器件受到挤压产生变形,甚至出现结构破坏.目前,已开展的金星着陆探测均采用压力容器的主体结构形式,高压环境对着陆器的结构、密封性等都提出了很高的要求.除此之外,金星高空中的酸雨云和大气中的 SO_2 , HCl , HF , H_2S 等成分在高温高压下呈现出明显腐蚀性.Lukco 等^[22]利用美国宇航局格伦研究中心的格伦极端环境模拟实验装置(GEER)开展了多种材料的环境适应性测试.试验结果表明, Pt, Pb, Ni 和 Cu 等金属在金星环境中会形成硫化物,可伐合金和铬镍铁合金也会产生不同程度的反应和降解,如图 2 所示,而 Au, Ir, SiO_2 , SiC , AlN , Si_3N_4 和 Al_2O_3 等材料未发生反应,具有较好的环境适应性。

3 影响着陆器长寿命生存的关键要素及研究进展

迄今为止,所有的金星着陆器均采用传统电池供

图2 金星极端环境下材料表面的晶体生长^[22]Fig. 2 Crystal growth on the surface of materials in Venus's extreme environments^[22]

电, 利用压力容器为电子设备提供适宜的工作压力环境, 通过隔热和储热的设计来减慢电子设备的温升速率, 因此着陆器的生存时长都很短. 面向未来的金星探测需求, 为了获取更多的金星表面科学数据, 需要开展技术研究, 以提升金星着陆器的工作寿命. 抗高压结构设计、耐高温电子设备、能源系统和热控技术等方面的研究不断深入, 为金星着陆器的长寿命生存设计奠定了基础.

3.1 轻质抗高压结构设计

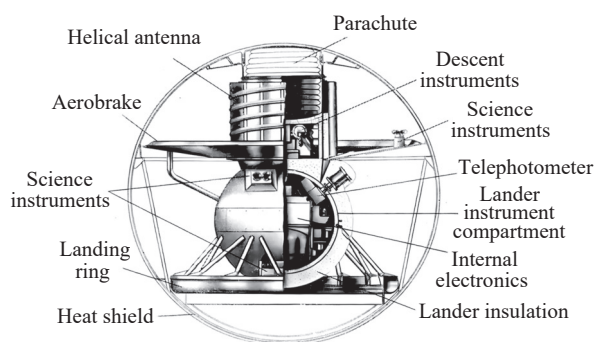
图3给出了Venera 9金星着陆器结构. 着陆器通常采用压力容器作为主体结构, 各电子设备和科学载荷放置在压力容器内, 以降低金星表面极端环境的影响. 着陆器整体分为上下两层, 上层主要包括降落伞、气动减速盘、螺旋天线和仅在下降过程中工作的部分电子设备; 下层包括压力容器、着陆环和内部电子设备. 苏联的金星着陆器最早采用的是铝合金材料, 但探测结果表明铝合金耐压能力无法满足金星表面的抗压需求, 后来为了提升着陆器的耐压能力换用钛合金材料, 实现了金星的成功着陆. 以压力容器作为金星着陆器主体结构时, 压力容器应满足如下要求.

(1) 压力容器的耐压能力应满足金星环境高温高压的需求.

(2) 压力容器表面需设计多个窗口, 用于内部设备和科学仪器对金星环境开展科学探测.

(3) 压力容器应具有较低的结构重量系数, 在满足压力容器耐高温高压需求的情况下, 开展轻量化设计, 提高质量利用率.

(4) 压力容器应具备良好的密封性, 通常探测器壳体上会设计多个适用于可见光和红外波长的窗口. 为了长时间维持容器内压力, 同时避免金星大气将热量带入着陆器内部, 各窗口需要开展针对性的密封

图3 Venera 9 着陆器结构^[23]Fig. 3 Structure of Venera 9 lander^[23]

设计.

Pauken 等^[24]分析了金星的环境特点, 提出了金星着陆器压力容器的设计准则, 压力容器应满足如下三个基本机械参数.

(1) 在 15 MPa 的极限负载下, 压力容器的折减因子应能达到 0.14, NASA 采用的通用标准为 0.30.

(2) 在 12.5 MPa 的耐压下不屈服.

(3) 在 10 MPa 的外部负载下, 10 h 内的总允许蠕变必须小于 0.5%.

除此之外, 压力容器材料还应考虑与金星化学环境的相容性、断裂韧性、热容和热膨胀系数等. 采用钛合金制造压力容器, 虽然能满足金星的高压环境, 但是质量占比会很高, 甚至超过着陆器总重量的 40%, 未来可开展着陆器压力容器减重设计.

美国 NASA 格伦研究中心^[19]开展了多种材料的环境适应性测试. 测试结果表明, Au, Ir, SiO₂, SiC, AlN, Si₃N₄ 和 Al₂O₃ 等材料具有较好的环境适应性. 除了 Au 以外, 其他材料的密度均低于钛合金, 并且均能够耐高温, 耐腐蚀, 但是大都存在硬度高、脆性大的问题, 加工难度大, 且无法满足金星着陆器

抗冲击的需求。

近年来,随着材料技术的发展,研究发现,通过定向缠绕高强度、高刚度纤维,连续纤维增强复合材料可以实现高比强度和高比模量,在轻型耐压结构的制备方向展现出巨大的潜力。2002年美国千米级潜艇 Deep Flight I号采用玻璃纤维/环氧树脂复合材料制备了耐压壳体^[25,26]。中国科学院空间应用工程与技术中心采用碳纤维增强树脂基复合材料制备了轻量化复合材料耐压舱体,较 Ti64 钛合金减重 20% 以上^[25],耐压可达 45 MPa。复合材料具有密度小、耐压能力强的优点,但是随着温度的升高,复合材料的力学性能会有不同程度的降低,并且为了满足科学探测需求,金星着陆器压力容器表面需设计多个窗口,这给复合材料压力容器的设计带来了更大的困难。

除此之外,蜂窝结构和增材点阵结构也为压力容器的设计提供了新的思路,不仅可以实现减重设计,还可以降低压力容器的等效热导率,减小外部高温热流对内部电子设备的影响。目前,以金星极端高温高压环境为应用背景的蜂窝结构或增材点阵结构的压力容器尚未见诸于报道。

3.2 高温电子设备

目前已开展的金星着陆探测均因温度过高而失效,由此可见金星的极端高温环境严重影响着陆器的寿命。若能提升着陆器电子设备(例如通信设备、科学载荷和传感器等)的耐受温度,可有效提升着陆器的工作时长,从而获取更多的科学数据。

传统航天器的电子元器件通常采用硅基半导体集成电路,但硅基元器件通常额定工作温度仅为 125℃,必须采用主动或被动热控措施才能在金星表面正常工作,热控资源需求非常高。近年来,研究在硅基芯片的基础上采用 SOI CMOS (Silicon-On-Insulator Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)^[27] 工艺,开发出耐温可达 300℃ 的器件^[28],如微控制器、晶振时钟、线性稳压器和放大器等,但这些器件仍无法直接在金星的高温环境下工作。面向金星着陆探测的需求,NASA 格伦研究中心^[29]提出了基于 SiC 的耐高温电子元器件的技术路线,研发出耐温超过 500℃ 的小规模集成电路^[30-33]、差分放大器^[34]、反相放大器、环形振荡器^[35]、NOR (NOR Gate) 和 NOT (NOT Gate) 栅极,并在金星模拟环境中开展了试验测试。截至 2023 年, SiC 高温电子设备已开发到第

12 代^[29],开发出 248 bit 的 RAM (Random Access Memory),如图 4 所示,其中包含约 2000 个碳化硅晶体管,集成电路栅极宽度达到 3 μm,研制出 5 mm×5 mm 大小的芯片,包含 62 个 I/O 键合垫,相当于 1970—1980 年硅基电子设备的复杂程度,实现了更高集成度的数字和模拟集成电路,为未来的金星长寿命着陆探测器的研发奠定了基础。

3.3 能源系统

金星着陆器的长寿命生存离不开能源系统的支持。极端环境给能源系统带来了巨大的挑战,经过多年研究,提出了多种可能的解决方案,主要包括太阳能、放射性同位素电源、风能、高温电池及其他形式的能源系统。

3.3.1 太阳能

太阳能电源主要指通过光电效应直接把光能转化为电能的装置,是目前空间探测中应用最多的电源系统^[36]。但是,金星表面的特殊环境给太阳能光伏发电应用带来巨大的挑战^[17,18],主要体现在四个方面:温度、太阳辐照强度、太阳光谱分布和腐蚀性环境。金星表面的极端高温会使光伏电池的暗电流增大,产生明显的压损,使电池性能下降。金星的大气结构和组成对太阳光有强烈的吸收作用,根据 Venera 系列任务的探测和其他观测结果分析,金星表面的太阳辐照通量平均仅为 33 W·m⁻²^[12],其光谱分布随海拔高度的变化如图 5 所示。综合影响下,太阳能电池的效

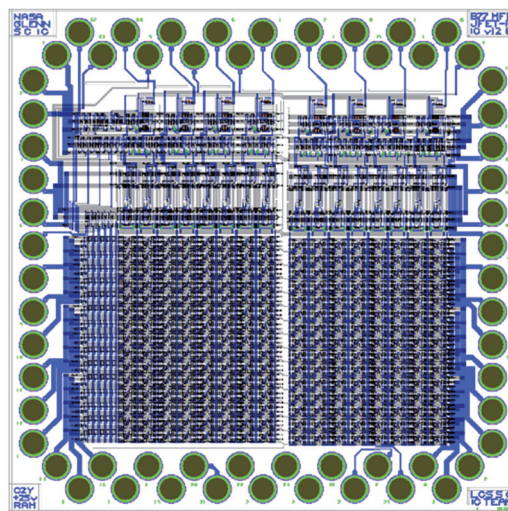


图 4 NASA 第 12 代 SiC 耐高温集成电路^[29]

Fig. 4 Integrated circuit diagram of NASA's Version 12 SiC high temperature resistant^[29]

率显著下降, 预计将降至 7%~10%^[37]. 除此之外, 高温可能会使太阳能电池因金属扩散与底层半导体接触而损坏; 大气中的腐蚀性气体也可能导致电池被侵蚀而损坏.

针对太阳能电池高温性能下降的问题, 研究发现, 通过采用宽禁带电池 (例如 GaAs, GaInP) 可减弱高温的影响. Bermudez 等^[19] 在 465℃ 的真空环境下测试了 GaInP/GaAs 电池的性能, 结果表明, 该电池具有较好的高温适应性, 在模拟金星高温和辐照下的发电功率约为 $4.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Perl 等^[38] 开展了 (Al) GaInP/GaAs 太阳能电池性能研究, 结果表明, 在 400℃ 下电池效率最高可达 16.4%, 且 200 h 高温考核后, 电池的相对效率损失仅为 1%. 针对金星环境可能存在的环境腐蚀等因素, 可通过玻璃封装^[20] 的方式提升电池的环境适应能力.

虽然通过采用宽禁带电池可以在金星表面实现太阳能发电, 但金星大气显著降低了太阳能电池接收到的太阳辐射通量, 宽禁带电池在金星的发电功率比地球轨道常用的太阳能电池低两个数量级, 所需要的太阳能帆板面积更大, 重量更高. 同时, 宽禁带电池的

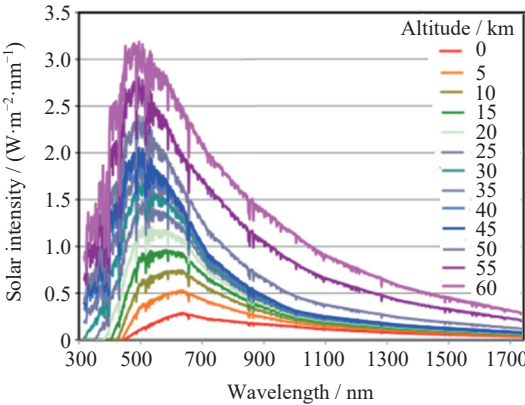


图 5 金星表面太阳辐照光谱分布^[17]
Fig. 5 Spectral distribution of solar irradiation on the Venus surface^[17]

发电量还会受到太阳高度角的影响, 若没有配套的耐高温太阳追踪机构, 实际的发电功率还会进一步降低. 因此, 太阳能发电难以满足金星着陆探测的能量需求.

3.3.2 放射性同位素电源

放射性同位素电源^[36] 是利用各种能量转换方式将同位素衰变产生的热能转化成电能的电源装置, 具有不依赖太阳、自主产生能量、能量密度高、环境适应性强等显著优势. Salazar 等^[39] 提出了一种应用于金星着陆器的小型低功率放射性同位素电源设计方案, 以温度高达 1275 K 的钚 238 为热端, 金星环境为冷端, 采用 SiGe 热电材料进行热电转换. 整个电源系统重量 24 kg, 可在 117 个地球日的时间内, 持续提供不小于 20 W 的功率输出. NASA 的研究团队^[14] 也论证了金星着陆器采用放射性同位素电源为金星着陆器供电的可行性, 并分别对静态热电转换和动态发电系统进行了研究. 两种路线均采用钚 238 作为热源, 与金星环境之间形成稳定的温差, 一种利用热电转化器实现静态热电转换, 另一种采用斯特林发电机, 通过温差驱动斯特林发电机发电, 为系统提供持续供电, 电源性能列于表 2. 利用放射性同位素热源, NASA 格伦研究中心开发了一种高温发电机^[40], 已在 540℃ 环境下完成超过 27.5 h 的测试.

目前, 放射性同位素电源已经应用在月球和火星探测器中, 技术成熟度较高. 在此基础上论证了放射性同位素电源作为金星着陆器能源系统的可行性, 并设计了两种方案, 其中常规静态热电转换系统简单, 可靠性高, 但效率较低; 而基于斯特林发电机的动态发电系统效率高, 但因包含运动部件, 系统更复杂, 可靠性相对较低. 面向未来金星探测的需求, 还需开展放射性同位素电源的金星环境适应性研究.

3.3.3 风能

金星表面的风速很小^[41,42], 可能低于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在这种情况下, 风力发电能力非常弱, 要实现为着陆器

表 2 放射性同位素电源性能
Table 2 Performance of radioisotope power source

序号	重量/kg	功率/W	热端温度/℃	冷端温度/℃	效率/(%)
1 ^[11]	24	26	1077	600	5
2 ^[11]	21.6	478	1200	500	23.4
3 ^[34]	23.78	25.7	1002	500	6.26

持续供电, 需要采用大尺寸的风力发电机. 如图 6 所示, 美国宇航局格伦研究中心提出了一种长寿命原位探测器^[43], 利用顶部的小型风力涡轮机发电, 结合可充电电池为探测器提供持续的电能输出, 理论上可以实现长时间探测. Benigno 等^[42]也提出了一种基于涡轮风力发电的金星巡视器设计概念, 分析结果表明, 当面积达到 5 m^2 , 风速为 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 可产生 5.2 W 的电能. Sauder 等^[44]也对涡轮风力发电能力进行了分析, 假定效率为 42%, 直径 3 m 的涡轮在风速为 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时发电功率约为 5 W , 风速为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时发电功率可达 100 W .

苏联的金星系列探测任务中开展了 4 次风速测量, 显示金星表面风速约为 $0.4\sim 1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 理论上可采用风力发电作为金星着陆器的能量来源, 但是不同着陆点的短时测量无法表征金星表面的实际风速. 另外, 除了风速外, 风力发电能力也与涡轮叶片面积成正比. 上述分析表明, 风力发电所需的面积非常大, 图 6 所示的巡视器叶片面积达到 10 m^2 时才能在 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速下产生 10.4 W 的电能, 可见风力发电对重量和尺寸需求都非常大, 而且需要解决风力发电相关电子设备的金星极端环境适应性问题. 因此,

目前风力发电不适合作为金星着陆器的能源系统.

3.3.4 高温电池

电池是着陆器的重要组成部分. 苏联的 Venera 系列、Vega1 和 2 探测器采用传统的蓄电池为着陆器供电, 使着陆器着陆后能开展短时的科学探测. 为提升着陆器的生存时长, 研发耐高温、具有高比能量和能量密度的电池也是一种重要的技术途径.

常规电池例如锂电池、Ag-Zn 电池等通常都只应用在较低的温度环境中, 针对金星的高温环境, 可选用熔盐电池. 熔盐电池以固体盐为电解质, 高温熔化后, 熔融盐被激活成离子导体, 其电导率显著增加, 通过特定的化学反应使正负极发生氧化和还原反应, 实现充放电. 金星的高温环境恰好为一些熔盐电池的工作提供了合适的温度条件. 相比锂电池, 熔盐电池通常具有更高的功率密度和更低的自放电. 目前可选用的高温熔盐电池主要有 Na-S 电池^[14,39,45]、Na-NiCl₂ 电池^[46]和 LiAl-FeS₂^[47,48] 电池, 相关性能参数列于表 3. 另外, Glass 等^[21]基于 Li-Al 负极、LiCl-KCl 共晶熔盐和 FeS 阴极开发了新的高温电池, 并开展了高温考核试验, 结果表明其可以在金星的高温 ($465\text{ }^{\circ}\text{C}$) 表面温度下存活下来, 并持续运行长达 26 d.

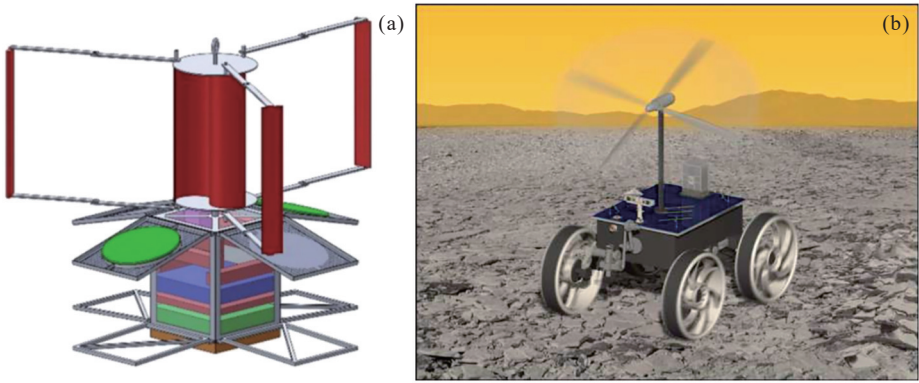


图 6 基于风力发电的金星着陆器 (a)^[43] 和巡视器 (b)^[42]
Fig. 6 Venus lander (a)^[43] and rover (b)^[42] based on wind power

表 3 高温电池^[21,49]
Table 3 High-temperature batteries^[21,49]

电池	LiAl-FeS ₂	Na-NiCl ₂	Na-S
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	400~475	250~500	290~450
电压/V	1.73/1.33	2.58	2.08
比能量/ $(\text{W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1})$	100	90~100	80~120

虽然熔盐电池具有功率密度高和耐高温等优点, 并且 300 °C 以下的熔盐电池已有商用案例, 但耐受温度达到 465 °C 的熔盐电池仍面临安全性和稳定性等问题. 未来需进行进一步的工艺改进和研发, 提升功率密度、可靠性和金星极端环境的适应性, 为低功耗金星着陆器提供电能, 实现更长时间的金星探测.

3.3.5 其他

Miller 等^[50]提出了一种以金属为燃料的燃烧动力装置, 以镁、锂或相关合金材料为燃料, 与金星大气中的 CO₂ 发生燃烧反应, 通过斯特林发电机产生电能. 受限金星大气的吸收, 金星表面的太阳辐照很弱, 难以采用太阳能光伏电池进行发电, Granddier 等^[51]提出了一种新型架构, 由高空平台和着陆器组成, 高空平台可飞到金星云层以上, 利用光伏电池发电, 着陆器内部设计可充电电池, 当着陆器需要充电时, 平台飞到着陆器上方, 通过激光功率转换装置将能量从平台传输到着陆器, 充电完成后, 重新飞到金星云层上方, 循环往复, 从而满足金星着陆器的长寿命生存的供电需求. 该方案复杂性更高, 涉及远程无线充电、金星飞行器、耐高温电池等多项技术, 目前仅为概念性设计, 短期内无法应用于金星着陆探测.

3.4 热控技术

与传统航天器热控不同, 金星着陆器将面临极端高温高压环境的考验, 传统航天器 (卫星、月球着陆器、火星着陆器等) 通常都可以利用空间冷背景进行辐射散热, 而金星稠密的大气层使金星着陆器缺少可利用的冷环境, 整个着陆器全寿命过程中都将处于极端高温环境中. 要提高着陆器的工作寿命, 除了提升电子设备的耐受温度, 保证电子设备在更高的温度下能够正常工作外, 还可以采取高效热控措施, 使电子设备能够更长时间维持在工作温度范围内.

基于能量守恒定律, 延长金星着陆器工作寿命的热控方法可以从热量存储、热量转移和热量转化等三个方面来开展研究.

3.4.1 隔热与储热

电子设备因热量累积导致温度升高超过使用温度而失效. 金星着陆器的热量主要来自两方面, 一是金星的极端高温环境与着陆器之间的导热和对流换热会引入大量的热; 另一方面着陆器内电子设备工作持续发热而产生热量累积. 针对着陆器外部的高温高压环境, 可在着陆器结构壳体的内壁采用隔热措施,

尽量减小高温环境的热量传递到着陆器内部. 苏联的金星着陆探测器中, 最初选用玻璃纤维和玻璃棉进行隔热, 后来改用一种高温聚氨酯泡沫 KG-25 进行隔热, 有效降低了外热流的影响. 针对着陆器内部的热量累积, 可以提高系统储热能力, 从而降低电子设备温升, 延长工作时间.

真空环境中, 航天器常采用多层隔热组件进行辐射屏蔽隔热, 真空状态下, 其当量导热系数可达 $10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. 但是金星着陆器内部通常会维持一定的压力, 避免着陆器从地金转移轨道的高真空环境中进入金星高压环境中因外部气体渗入引起电子设备低气压放电而失效. 在气体氛围下, 传统航天器采用的多层隔热组件的隔热性能受气体分子导热影响, 明显下降, 因此可采用新型低密度纳米气凝胶进行隔热. 该材料是一种轻质多孔材料, 具有极低的密度、高比表面积和高孔隙率, 孔径一般小于 50 nm, 小于气体分子运动自由程 (空气分子的平均自由程约 70 nm), 可以显著降低分子间的导热和对流换热效应, 从而在气体环境中仍具有优异的隔热性能, 其热导率低至 $0.008 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

提升着陆器的储热能力是延长着陆器寿命的重要手段之一. 理想的相变储热材料应具备高密度、高热导率、高比热、高潜热等性质, 但尚无单一材料能同时满足. 常规用于电子设备温控的相变材料主要有水合盐、有机物 (例如石蜡、硬脂酸)、水和一些低熔点的金属及合金, 其热物性如表 4 所示.

水合盐类相变材料潜热较大, 但存在一定的腐蚀性和过冷的情况; 石蜡类相变材料是目前相变温控应用最广的材料, 其性质稳定, 潜热大, 但是密度和导热系数较小; 其他有机相变材料性质与石蜡近似, 部分存在一定的腐蚀性; 金属及其合金类相变材料热导率高, 潜热较小, 但是密度很大, 单位体积下的储热能力强.

通常气液相变的潜热要大于固液相变的潜热. 例如, 水的固液相变潜热为 $335 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而气液相变潜热高达 $2257 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (常压下, 100 °C), 如果能够采用气液相变吸收电子设备的发热, 所需的重量资源会显著下降. 考虑到气液相变会导致物质体积变化非常大, 可以采用将饱和蒸汽排放到金星大气环境中的方法进行消耗性散热. 美国先进冷却技术公司^[52]开展了相关研究, 搭建了原理样机, 选用氨作为散热工质, 气

表 4 常用于电子设备温控的相变材料的热物性
Table 4 Thermal physical properties of phase change materials commonly used for temperature control in electronic devices

序号	名称	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	潜热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	相变温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	$\text{LiNO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1500	235	30
2	$\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1450	254	58
3	$\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1710	191	29
4	$\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	1490	254	32.4
5	石蜡类 (十八烷~二十八烷)	约810	244~254	28~61
6	聚乙二醇	1 212	190	66
7	硬脂酸	840	200	56
8	Ga-Sn	6010	78	20
9	Cerrolow-136	8600	91	57.8
10	Cerrobend	9400	33	70
11	H_2O (冰)	917	335	0

液相变潜热为 $1230\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, 由于其饱和蒸汽压要低于金星环境大气压, 因此采用更高压的氦气作为辅助排气. 系统由三个压力容器、管路和配套传感器组成, 原理如图 7 所示. 系统工作时, 液氨吸热汽化, 利用高压氦气辅助, 将饱和蒸汽排到金星环境中, 带走内部热量, 循环往复直至工质消耗完. 试验研究表明, 当电子设备热耗 150 W , 连续工质 24 h 时, 需要消耗 18 kg 工质 (75% 的氨和 25% 的氦气).

俄罗斯科学院的 Ekonomov 等^[53] 针对金星着陆器高温砷化镓电子设备的长寿命生存问题给出了一种基于蓄热的热控方案. 高温砷化镓电子设备可以在 350°C 的高温下工作, 可以采用高热容量的水作为蓄热材料. 在 9.2 MPa 的压力下, 水气化的相变潜热高达 $1372\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其沸点约为 305°C . 图 8 给出了着陆器载荷舱的热控原理, 载荷舱由多层壳体组成, 壳体选用钛合金材料, 内外两层壳体间设计成水容器, 电子设备位于内层壳体中. 水具有很高的比热和相变潜热, 一方面可以吸收金星高温环境引入的外热流, 另一方面可以吸收内部电子设备的发热. 水温达到 305°C 后发生沸腾, 内部压力超过金星环境压力后, 水蒸气将热量传递到金星环境中, 内部维持 305°C , 满足高温砷化镓电子设备的使用温度. 通过调控着陆器携带的水的重量, 可以调控着陆器的工作时长.

3.4.2 热量转移

热量转移是最常用的一种热控方式. 在金星着陆

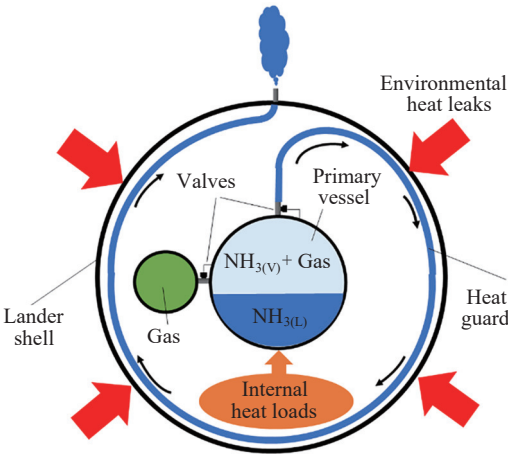
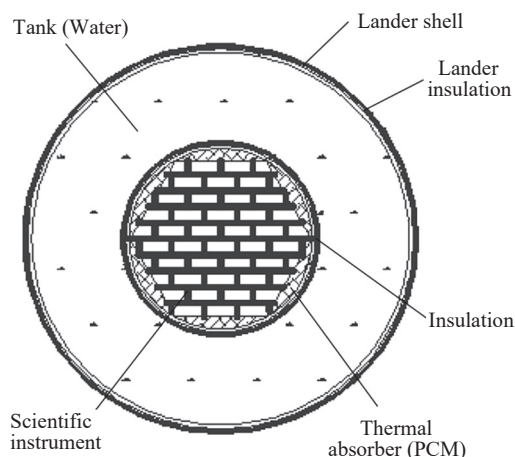


图 7 金星着陆器气液相变温控原理^[52]

Fig. 7 Schematic of the Venus lander gas-liquid phase change temperature control^[52]

器中, 为避免电子设备温升过高, 需要将热量从着陆器内部低温区 (通常 $<100^{\circ}\text{C}$) 转移到外部金星环境的高温区 ($>460^{\circ}\text{C}$). 根据热力学第二定律, 热量无法自发地从低温区传递到高温区. 因此, 要实现热量的反向传递必须以消耗其他形式的能量为代价, 也就是通常所说的主动制冷, 例如蒸汽压缩制冷和斯特林制冷等.

(1) 蒸汽压缩式制冷. 蒸汽压缩式制冷是目前最常用的一种制冷方式, 例如空调、冰箱. Anderson 等^[54] 根据金星环境设计了多级压缩制冷循环, 原理如图 9

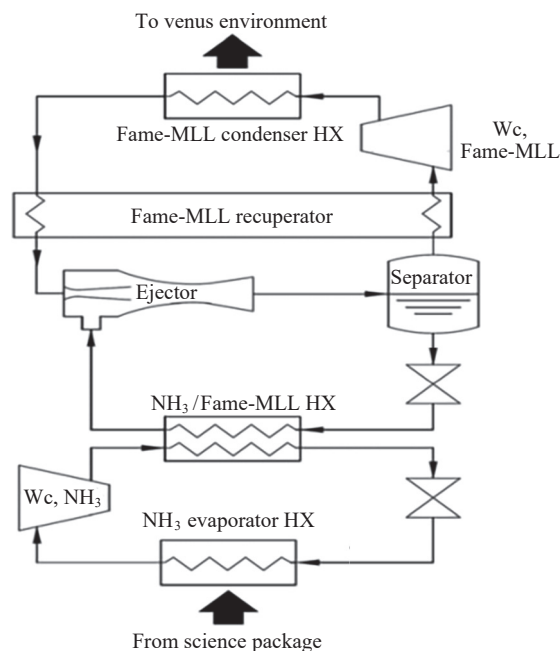
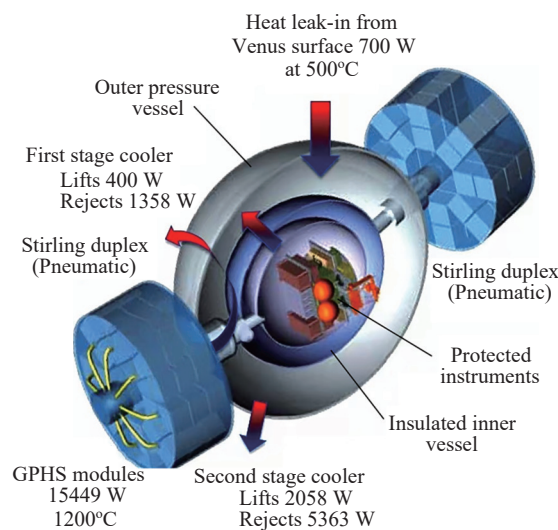
图 8 载荷舱热控原理^[53]Fig. 8 Thermal control schematic diagram of payload bay^[53]

所示, 通过多级制冷实现常温到高温环境 (467℃) 的热量转运。仿真分析结果表明, 通过级联制冷循环, 在有效载荷温度为 100℃, 散热器温度为 465℃ 的情况下, 制冷效果可达 100 W, 总循环压缩机功率约为 115 W, 级联系统的制冷性能系数约为 0.87。

(2) 斯特林制冷. NASA 联合 Sunpower 公司开展了高温斯特林制冷^[55-57] 的相关研究, 设计了一个通过斯特林发动机发电, 利用两级斯特林制冷机制冷的系统, 拟将总热耗 400 W 的载荷电子设备维持在 30℃, 实现着陆器长寿命生存, 如图 10 所示。系统通过放射性同位素热源提供高温 (1200℃) 热源, 冷端设计温度为 500℃, 由此驱动斯特林发动机发电, 提供给着陆器。着陆器内部采用两级斯特林制冷。一级致冷热量 (400 W) 先从 30℃ 提升到 250℃ (共需排出 1358 W 的热量); 二级致冷吸收环境进入的热量 (700 W) 和一级致冷产生的热量 (1358 W), 然后从 250℃ (2058 W) 提升到 500℃ (共需排出 5363 W 的热量), 最后传递到金星大气环境中。

3.4.3 热量转化

热能是自然界中的一种基本能量形式, 可以转化为机械能、电能、光能和化学能等多种形式的能量。但热能的转化通常需要存在正向的温差或较高的能量密度, 金星着陆探测中, 电子设备的温度比环境温度低很多, 且能量密度很低, 难以直接转化成机械能或电能等其他形式的能量。针对金星着陆器内部电子设备发热, 目前可采用的能量转化形式为利用吸热化学反应, 将热能转化为化学能, 例如 $2\text{NH}_4\text{Cl(s)} +$

图 9 应用于金星环境的多级压缩制冷循环^[54]Fig. 9 Multi-stage compression refrigeration cycle applied in Venus environment^[54]图 10 金星长寿命着陆器热控设计原理^[56]Fig. 10 Thermal control design schematic diagram of a Venus long-lived lander^[56]

$\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O(s)} = \text{BaCl}_2\text{(s)} + 2\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O(aq)} + 8\text{H}_2\text{O(l)}$, 其吸热量约为 $106.85\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。利用该反应, 可以吸收电子设备的发热, 转化为化学能, 降低系统温升。与相变储热技术相似, 利用该技术能够吸收的热量总量依赖于能携带的化学物质的总质量, 可用于相对短时的金星着陆器的热控系统。

4 金星着陆器设计建议

提升金星着陆器的生存时间能够减少金星探测对发射任务的依赖,提升探测效率和科学数据的连续性,对金星的探测和科学研究具有重大意义.基于上述分析,建议从以下四个方面开展长寿命金星着陆器的设计与研制.

(1) 着陆器结构. 着陆器的结构与电子设备的耐温和耐压性能密切相关. 近期任务中还难以实现所有电子设备的耐受温度均能达到金星表面极端高温以上,因此整体结构仍以压力容器为主体,以钛合金为主体结构材料,未来可开展蜂窝结构、点阵结构和以复合材料为代表的轻质耐高温高压压力容器研究,为内部电子设备提供良好的压力环境,为外部电子设备提供高承载、高可靠的结构基础.

(2) 着陆器能源系统. 根据着陆器的规模分别采取不同的能源系统设计方案. 对于小型着陆器,系统的功耗较小,建议采用“高温电池+锂电池”的设计思路,仅为电子设备供电,一方面满足不同飞行阶段的供电需求,另一方面降低能源系统对重量和热控资源的需求. 对于大型着陆器,系统功耗大,建议采用“放射性同位素电源+锂电池”的设计方案,满足电子设备供电需求的同时,为着陆器的主动制冷装置供电,满足内部电子设备长期工作的控温需求.

(3) 耐高温电子设备. 近期任务中建议在现有成熟硅基芯片的基础上采用 SOI CMOS 工艺,将电子设备的耐温能力提升到 300℃,降低其对热控资源的需求;中长期任务中研发以 SiC 半导体为核心的耐高温电子设备和传感器,满足着陆器全寿命数据采集和通信的需求. 无法耐受金星极端高温高压的设备仍安装在压力容器内,通过热控系统,尽可能长时间将其维持在工作温度范围内.

(4) 热控系统. 开展高性能储热材料、隔热材料、高温斯特林制冷或压缩制冷技术研究. 小型着陆器的热控系统建议以隔热和储热设计为主,利用高性能的隔热材料减小金星环境外热流对内部电子设备的影响,采用高性能储热材料,提升系统的热容量. 大型着陆器在此基础上增加主动制冷设备,以能源系统的供电为能量来源,实现热量向金星环境的转移,保障内部电子设备长期工作的温控需求.

5 结论

金星作为地球的姊妹星,具有极大的科学探索价值. 金星表面的极端环境给着陆器的长时间原位探测带来巨大挑战. 传统的电子设备、能源系统和热控手段难以满足长寿命探测的需求. 耐高温电子设备、能源系统和热控手段是金星着陆长寿命生存的重要研究方向. 本文基于金星极端环境对着陆器长寿命生存的影响,从抗高压结构设计、耐高温电子设备、能源系统和热控技术四个方面对金星着陆器长寿命生存技术研究进展进行了分析,指出了各技术方案的优缺点,并给出了设计建议,为未来中国可能开展的金星着陆探测提供了参考.

参考文献

- [1] ZHAO Yuyan, LIU Jianzhong, ZOU Yongliao, *et al.* Progress and future prospects of Venus exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(9): 2703-2724 (赵宇娟, 刘建忠, 邹永廖等. 金星探测研究进展与未来展望 [J]. 地质学报, 2021, **95**(9): 2703-2724)
- [2] ZORZANO M P, OLSSON-FRANCIS K, DORAN P T, *et al.* The COSPAR planetary protection requirements for space missions to Venus[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2023, **37**: 18-24
- [3] GHAIL R C, HALL D, MASON P J, *et al.* VenSAR on EnVision: taking earth observation radar to Venus[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, **64**: 365-376
- [4] ZASOVA L V, GORINOV D A, EISMONT N A, *et al.* Venera-D: a design of an automatic space station for venus exploration[J]. *Solar System Research*, 2019, **53**(7): 506-510
- [5] HAN Lin, YANG Fan, FAN Weiwei, *et al.* Trends and strategic planning researches of venus exploration abroad[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(5): 753-762 (韩淋, 杨帆, 范唯唯等. 国外金星探测发展态势及战略规划解析 [J]. 空间科学学报, 2024, **44**(5): 753-762)
- [6] VEXAG. Roadmap for Venus exploration[EB/OL]. (2019-10-01)[2024-03-27]. https://www.lpi.usra.edu/vexag/documents/reports/VEXAG_Venus_Roadmap_2019.pdf
- [7] COLLETTE J P, ROCHUS P, PEYROU-LAUGA R, *et al.* Phase change material device for spacecraft thermal control[C]//Proceedings of the 62nd International Astronautical Congress. Cape Town, South Africa, 2011: 6020-6031
- [8] BIENSTOCK B J. Pioneer Venus and Galileo entry probe heritage[C]//Proceedings of the International Workshop Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science. Lisbon, Portugal: ESA Publications Division, 2004: 37-45
- [9] ABDRAKHIMOV A M, BASILEVSKY A T. Geology of

- the venera and vega landing-site regions[J]. *Solar System Research*, 2002, **36**(2): 136-159
- [10] ANDO H, IMAMURA T, TELLMANN S, *et al.* Thermal structure of the Venusian atmosphere from the sub-cloud region to the mesosphere as observed by radio occultation[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 3448
- [11] GRANDIDIER J, KIRK A P, JAHELKA P, *et al.* Photovoltaic operation in the lower atmosphere and at the surface of Venus[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2020, **28**(6): 545-553
- [12] TITOV D V, BULLOCK M A, CRISP D, *et al.* Radiation in the atmosphere of venus[J]. *Washington Dc American Geophysical Union Geophysical Monograph*, 2007, **176**: 121-138
- [13] SINGH D. Venus nightside surface temperature[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 1137
- [14] LANDIS G A, MELLOTT K C. Venus surface power and cooling systems[J]. *Acta Astronautica*, 2007, **61**(11/12): 995-1001
- [15] DELITSKY M L, BAINES K H. Cloud chemistry on Venus: sulfuric acid reactions and supercooling in Venus liquid cloud droplets[J]. *Planetary and Space Science*, 2023, **237**: 105750
- [16] KRASNOPOLSKY V A. Vertical profiles of H₂O, H₂SO₄, and sulfuric acid concentration at 45–75 km on Venus[J]. *Icarus*, 2015, **252**: 327-333
- [17] LANDIS G A, HAAG E. Analysis of solar cell efficiency for venus atmosphere and surface missions[C]//Proceedings of the 11th International Energy Conversion Engineering Conference. San Jose: AIAA, 2013: 4028
- [18] GRANDIDIER J, KIRK A P, OSOWSKI M L, *et al.* Low-Intensity High-Temperature (LIHT) solar cells for venus atmosphere[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, **8**(6): 1621-1626
- [19] BERMUDEZ-GARCIA A, VOARINO P, RACCURT O. Environments, needs and opportunities for future space photovoltaic power generation: a review[J]. *Applied Energy*, 2021, **290**(5): 116757
- [20] LANDIS G A. Power systems for Venus surface missions: a review[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **187**: 492-497
- [21] GLASS D E, JONES J P, SHEVADE A V, *et al.* High temperature primary battery for Venus surface missions[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, **449**: 227492
- [22] LUKCO D, SPRY D J, HARVEY R P, *et al.* Chemical analysis of materials exposed to Venus temperature and surface atmosphere[J]. *Earth and Space Science*, 2018, **5**(7): 270-284
- [23] HUNTRESS W T JR, MAROV M Y. Soviet Robots in the Solar System[M]. New York: Springer, 2011
- [24] PAUKEN M, KOLAWA E, MANVI R, *et al.* Pressure vessel technology development[C]//Proceedings of the 4th International Planetary Probe Workshop. Pasadena, CA, USA: California Institute of Technology, 2006
- [25] YANG Rui, MA Yingjie. Status and prospect of key materials for deep submergence facilities[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, **1**(2): 145-156 (杨锐, 马英杰. 深潜装备用关键材料现状与展望 [J]. 前瞻科技, 2022, **1**(2): 145-156)
- [26] LUO Shan, LI Yongsheng, WANG Weibo. Development and prospects of non-metallic submersible pressure hull[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, **15**(4): 9-18 (罗珊, 李永胜, 王纬波. 非金属潜水器耐压壳发展概况及展望 [J]. 中国舰船研究, 2020, **15**(4): 9-18)
- [27] LUO Ningsheng, CAO Jianwu. Development status and prospects of high-temperature SOI technology[J]. *Electronics & Packaging*, 2022, **22**(12): 85-93 (罗宁胜, 曹建武. 高温 SOI 技术的发展现状和前景 [J]. 电子与封装, 2022, **22**(12): 85-93)
- [28] PETROSYANTS K O, LEBEDEV S V, SAMBURSKY L M, *et al.* High temperature submicron SOI CMOS technology characterization for analog and digital applications up to 300°C[C]//Proceedings of the 2017 33rd Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium. San Jose: IEEE, 2017: 229-234
- [29] NEUDECK P G, SPRY D J, KRASOWSKI M J, *et al.* Recent progress in extreme environment durable SiC JFET-R integrated circuit technology[C]//Proceedings of the IMAPS 2023 Joint Conferences. Albuquerque: International Microelectronics Assembly & Packaging Society, 2023
- [30] NEUDECK P G, SPRY D J, CHEN L Y, *et al.* Demonstration of 4H-SiC digital integrated circuits above 800°C[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, **38**(8): 1082-1085
- [31] NEUDECK P G, SPRY D J, KRASOWSKI M J, *et al.* Year-long 500°C operational demonstration of up-scaled 4H-SiC JFET integrated circuits[J]. *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, 2018, **15**(4): 163-170
- [32] SPRY D J, NEUDECK P G, LUKCO D, *et al.* Prolonged 500°C operation of 100+ Transistor silicon carbide integrated circuits[J]. *Materials Science Forum*, 2018, **924**: 949-952
- [33] KIM H, BAGHERZADEH J, DRESLINSKI R G. SiC processors for extreme high-temperature venus surface exploration[C]//Proceedings of the 2022 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Antwerp: IEEE, 2022: 406-411
- [34] TIAN Y, LANNI L, RUSU A, *et al.* Silicon carbide fully differential amplifier characterized up to 500°C[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, **63**(6): 2242-2247
- [35] NEUDECK P G, MEREDITH R D, CHEN L, *et al.* Prolonged silicon carbide integrated circuit operation in Venus surface atmospheric conditions[J]. *AIP Advances*, 2016, **6**(12): 125119
- [36] NIU Changlei, LUO Zhifu, LEI Yingjun, *et al.* Advanced power source technology of deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, **7**(1): 24-34 (牛厂磊, 罗志福, 雷英俊, 等. 深空探测先进电源技术综述 [J]. 深

- 空探测学报, 2020, **7**(1): 24-34)
- [37] GRANDIDIER J, GOGNA P K, ERRICO M, *et al.* Solar cell measurements at high temperature[C]//Proceedings of 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference. New Orleans: IEEE, 2015: 1-3
- [38] PERL E E, SIMON J, FRIEDMAN D J, *et al.* (Al) GaInP/GaAs tandem solar cells for power conversion at elevated temperature and high concentration[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, **8**(2): 640-645
- [39] SALAZAR D, LANDIS G A, COLOZZA A J. Non-cooled power system for Venus lander[C]//Proceedings of the 12th International Energy Conversion Engineering Conference. Cleveland: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014: 3459
- [40] MONTAGUE G T, BROWN G V, MORRISON C R, *et al.* High-temperature switched-reluctance electric motor[R]. Cleveland: NASA Tech Briefs, 2003
- [41] LORENZ R D. Surface winds on Venus: probability distribution from in-situ measurements[J]. *Icarus*, 2016, **264**: 311-315
- [42] BENIGNO G, HOZA K, MOTIWALA S, *et al.* A wind-powered rover for a low-cost Venus mission[C]//Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Grapevine: AIAA, 2013: 586
- [43] KREMIC T, HUNTER G W. Long-Lived In-situ Solar System Explorer (LLISSE) potential contributions to solar system exploration[J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2021, **53**(4): 151
- [44] SAUDER J, WILCOX B, CUTTS J. An Airborne Turbine for Power Generation on Venus[C]//Proceedings of the 15th Meeting of the Venus Exploration and Analysis Group (VEXAG). Maryland: Lunar and Planetary Institute, 2017, 15(2061): 8037
- [45] MASSET P, SCHOEFFERT S, POINSON J Y, *et al.* Retained molten salt electrolytes in thermal batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, **139**(1/2): 356-365
- [46] LU X C, LEMMON J P, SPRENKLE V, *et al.* Sodium-beta alumina batteries: status and challenges[J]. *JOM*, 2010, **62**(9): 31-36
- [47] MASSET P, SCHOEFFERT S, POINSON J Y, *et al.* LiF-LiCl-LiI vs. LiF-LiBr-KBr as molten salt electrolyte in thermal batteries[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2005, **152**(2): A405
- [48] LANDIS G A, HARRISON R. Batteries for Venus surface operation[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, **26**(4): 649-654
- [49] LIN X R, SALARI M, ARAVA L M R, *et al.* High temperature electrical energy storage: advances, challenges, and frontiers[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, **45**(21): 5848-5887
- [50] MILLER T F, PAUL M V, OLESON S R. Combustion-based power source for Venus surface missions[J]. *Acta Astronautica*, 2016, **127**: 197-208
- [51] GRANDIDIER J, AKINS A, CRISP D, *et al.* Feasibility of power beaming through the Venus atmosphere[J]. *Acta Astronautica*, 2023, **211**: 376-381
- [52] LEE K L, TARAUC C. 24 Hours consumable-based cooling system for venus lander[C]//Proceedings of the 49th International Conference on Environmental Systems. Boston: 49th International Conference on Environmental Systems, 2019
- [53] EKONOMOV A P, KSANFOMALITY L V. On the thermal protection systems of landers for venus exploration[J]. *Solar System Research*, 2018, **52**(1): 37-43
- [54] ANDERSON K R, GROSS T, MCNAMARA C, *et al.* Venus lander electronics payload thermal management using a multistage refrigeration system[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2018, **32**(3): 659-668
- [55] TARAUC C, ANDERSON W, PETERS C. Thermal management system for long-lived venus landers[C]//Proceedings of the 9th Annual International Energy Conversion Engineering Conference. San Diego: AIAA, 2011: 5643
- [56] DYSON R W, SCHMITZ P C, PENSWICK L B, *et al.* Long-lived venus lander conceptual design: how to keep it cool[C]//Proceedings of the 7th International Energy Conversion and Engineering Conference. Denver: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 4631
- [57] FUGLESANG C, ZETTERLING C, WILSON C. Venus long-life surface package (VL2SP)[C]//Proceedings of the 68th International Astronautical Congress. Adelaide, Australia: Curran Associates, 2018: 3035-3043

作者简介



王虎军 男, 1986年2月出生于山东省威海市, 现为深空探测实验室总体技术研究院高级工程师, 主要研究方向为航天器热控设计和极端环境热控技术研究。
E-mail: wang_hujun945@163.com