

我国深空探测对航天材料及工艺的需求

沈自才¹ 欧阳晓平² 高 鸿³

(1 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

(2 西北核技术研究院, 西安 710024)

(3 中国空间技术研究院, 北京 100094)

文 摘 随着我国首次月球采样返回和火星探测器“天问一号”任务的圆满完成,我国深空探测进入了新的发展阶段。本文首先对我国深空探测的现状和发展趋势进行了分析,进而对深空探测面临的极端温度、强太阳电磁辐射、强粒子辐射、尘与尘暴、酸性大气等环境及对深空探测任务的影响进行了梳理,进而从材料及结构的轻量化、高效热控制、可靠的辐射防护与抗辐射能力、提供可持续的能源、具有较强的耐腐蚀性能、具有较好抗尘与尘暴损伤性能、在轨组装与制造等角度梳理了深空探测对航天材料与工艺的需求,最后从轻质结构机构材料、高效热控制材料、组合辐射防护及耐辐射材料、耐腐蚀材料、耐尘与尘暴材料、高可靠能源材料、3D/4D 打印技术等方面给出了深空探测材料与工艺的发展方向。

关键词 深空探测,航天材料,工艺,需求

中图分类号:O434.2

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.05.001

Demand for Aerospace Materials and Technology for China's Deep Space Exploration

SHEN Zicai¹ OUYANG Xiaoping² GAO Hong³

(1 Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094)

(2 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

(3 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

Abstract With China's first lunar sample return and the successful completion of the Mars rover "Tianwen" mission, China's deep space exploration has entered a new era. The current situation and development trend of deep space exploration in China is first analyzed, and then the deep space environments such as extreme temperature, strong solar electromagnetic radiation, strong particle radiation, dust and dust storms, acidic atmosphere and other environments were teased out, and the impact of deep space environments on deep space exploration tasks were summarized. The demand of aerospace materials and technologies for deep space exploration was reviewed such as the lightweight of materials and structures, efficient thermal management, reliable radiation protection and radiation resistance, sustainable energy supply, strong corrosion resistance, and good resistance to dust and dust storm damage, on-orbit assembly and manufacturing. Finally, the development directions of deep space exploration materials and processes which include lightweight structural materials, high-efficiency thermal management materials, combined radiation protection and radiation-resistant materials, corrosion-resistant materials, dust-resistant materials, high-reliability energy materials, 3D printing/4D printing technology and etc. were suggested.

Key words Deep space exploration, Aerospace materials, Technology, Demand

收稿日期:2021-06-26

基金项目:国家自然科学基金项目(11975052,11904376);国家重点研发计划(2018YFE0118000)

第一作者简介:沈自才,1980年出生,博士,高级工程师,主要从事航天器空间环境工程和航天材料工程学研究。E-mail: zicaishen@163.com

0 引言

随着人类的科技进步和经济发展,世界大国尤其是航天大国纷纷进一步开展针对深空的探测活动,其重要意义在于:一是可以进一步认识宇宙奥秘,追寻生命起源;二是促进国家的经济、政治和军事的进步;三是推动以新学科、新材料、新工艺、新技术等为代表的科技进步;四是激发与培养人类的创新能力,推动人类社会的可持续发展。

到目前为止,深空探测经历了两次高潮:一是在1958~1976年间以美苏空间竞赛为代表的第一波深空探测活动,取得了月球无人取样返回和阿波罗登月的伟大成就;二是1989年至今,以美国提出太空探测初步行动计划和人类重返月球为标志,拉开了第二次月球和深空探测活动高潮的序幕,除美国、俄罗斯之外,中国、欧空局、日本、印度为代表的航天强国及航天大国,均将开展以月球探测或重返月球以及

火星、金星、小行星等探测列入重点任务规划^[1-2],并取得了小天体采样返回和火星巡视探测的伟大成就。2018年9月,美国航空航天局(NASA)发布了《国家太空探索活动报告》,确定了美国未来载人深空探索的路线和计划,如图1所示^[3]。2019年2月,NASA正式发布公告号召私人企业参与到载人登月技术开发中来,包括参与登月系统登陆舱、太空加油系统和飞船的初步研究和开发,此外NASA还公布了2028年在私营企业协助下实现重返月球计划的路线图。2019年3月26日美国副总统彭斯表示,将在2024年之前让美国航天员重返月球,进一步加快了载人重返月球的步伐。NASA将在月球近直线光环轨道(NRH₀)采用国际合作的方式建设LOP-G空间站,可实现随时登陆月球,在此基础上开发月球资源,验证载人登陆火星所需关键技术,并最终实现载人探索火星的目标^[4]。

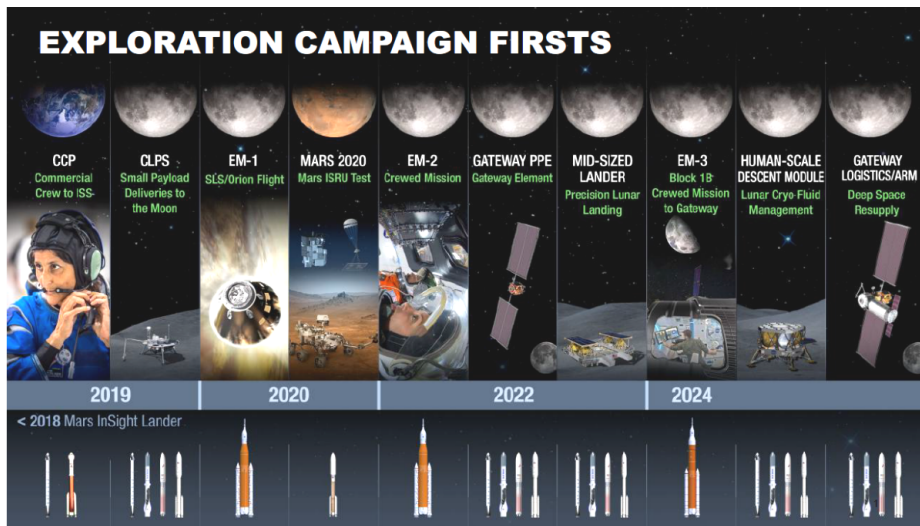


图1 美国载人登月和火星探测规划^[3]

Fig. 1 American's Moon to Mars Timeline^[3]

2020年前后,国内外在深空探测上取得了突破性的进展。2020年12月17日,我国“嫦娥五号”成功实现了月球背面软着陆和月球取样返回。2021年2月9日,阿联酋的“希望号”火星探测器也开始对火星开展环绕和大气成分探测。2021年2月18日,美国“毅力号”火星探测器在火星表面成功着陆,也是美国的第10次火星探测。2021年5月15日,我国“天问一号”火星探测器在实现绕火探测后又实现了火星表面的软着陆并开展巡视探测,取得了深空探测又一里程碑。未来,我国将进一步开展地内行星、地外行星、小行星等深空探测以及载人深空探测任务^[5]。

然而,不同于地球轨道的太空探测和短期深空探测任务,我国未来的深空探测任务必将面临大体积、长寿命、高可靠的要求,尤其是长周期任务必然带来更加复杂恶劣的太空环境如长期极端温度(高

温或低温以及高低温循环)环境、强辐射环境、酸性大气环境、尘与尘暴环境等,这将对航天器及探测任务带来更加严酷的空间环境影响,对深空探测器的材料和工艺带来新的挑战 and 新的需求^[6]。

本文在对我国深空探测现状和发展趋势分析的基础上,系统总结深空环境对航天器的影响,进而分析深空探测任务对航天材料及工艺的需求。

1 我国深空探测的现状与趋势

1.1 我国深空探测的现状

当前,我国的深空探测取得了突破性的进展,总体概括起来为:实现了月球探测“绕”、“落”、“回”三步走的伟大目标,实现了火星探测的软着陆和火星表面行走,以及对小行星图塔蒂斯的临近飞行探测。

1.1.1 月球探测“绕”、“落”、“回”目标实现

我国月球探测的目标分为三个阶段^[7-9],分别
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第5期

为:2007年实现绕月探测(一期工程)、2013年前后实现月面软着陆探测与巡视勘察(二期工程)、2020年实现月面采样返回(三期工程)。

2007年10月24日,我国深空探测首个探测器“嫦娥一号”成功发射并实现在200 km环月轨道上绕月飞行,圆满实现我国探月一期工程的任務目标^[9]。获取了我国首幅月面图像和120 m分辨率全月球立体影像图,以及月球表面14种元素含量和物质分布特点等大量科学探测数据。

2010年10月1日,“嫦娥二号”卫星成功发射,并在100 km环月轨道上对全月球进行高精度立体成像和15 km的近月轨道对“嫦娥三号”预选着陆区进行了详查^[11]。2013年12月2日,“嫦娥三号”卫星成功发射并在13 d后在月球西经19.5°、北纬44.1°的虹湾区精准着陆,成功实现着陆器与“玉兔号”月球车分离及两器互拍,并分别开展了月面巡视和就位探测,圆满完成“落”月任务^[12]。2018年12月8日,“嫦娥四号”卫星成功发射,并于2019年1月3日成功着陆在月球背面预选着陆区,实现了着陆器与“玉兔二号”月球车分离、两器互拍以及就位和巡视探测,任务取得圆满成功。这标志了探月二期任务取得了圆满成功^[13]。

2020年11月24日,“嫦娥五号”卫星成功发射,并于当年12月1日实现月球正面预选区着陆;12月2日,完成了月球钻取采样和封装,以及月面采样和封装;12月17日,“嫦娥五号”返回器顺利返回地球。这标志着我国探测三期任务取得了圆满成功。

1.1.2 火星“绕”、“落”、“巡”圆满完成

深空探测一直是我国航天事业的一项重要工作方向,我国也一直持续开展相关技术攻关工作^[14-15]。我国火星探测任务于2013年全面启动论证,2016年1月正式批复立项;2020年7月23日在文昌航天发射场发射成功;2021年2月到达火星附近;2021年5月15日,“天问一号”火星探测器在实现绕火探测后又实现了火星表面的软着陆;2021年6月11日,中国国家航天局发布了“天问一号”探测器着陆火星首批科学影像图揭幕仪式,公布了由“祝融号”火星车拍摄的着陆点全景、火星地形地貌、“中国印迹”(图2)和“着巡合影”等影像图^[16]。首批科学影像图的发布,标志着我国首次火星探测任务取得圆满成功。

“天问一号”任务实现了我国航天发展史上的6个首次^[16]:首次实现地火转移轨道探测器发射;首次实现行星际飞行;首次实现地外行星软着陆;首次实现地外行星表面巡视探测;首次实现4亿公里距离的测控通信;首次获取第一手的火星科学数据。“天问一号”不仅在火星上首次留下中国人的印迹,而且首

次成功实现了通过一次任务完成火星环绕、着陆和巡视三大目标,标志着我国在行星探测领域跨入世界先进行列。

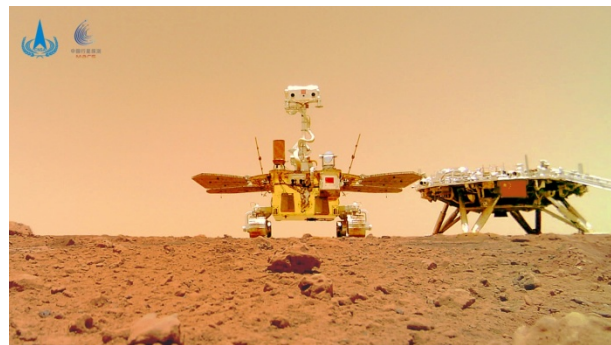


图2 我国首次火星任务“中国印迹”发布图^[16]

Fig. 2 Image of China's first mission to Mars—"Chinese Imprint"^[16]

1.1.3 小行星探测实现了突破进展

2011年8月,“嫦娥二号”卫星飞抵距地 1.5×10^9 m的日-地拉格朗日L2点^[17],开展了环绕L2点的空间探测;2012年12月13日,我国“嫦娥二号”探测器成功飞抵距地 7.0×10^9 m处,实现了与4179号(图塔蒂斯)小行星的交会飞越探测^[18],首次获得了该小行星的高分辨率光学图像,见图3^[19],揭示了图塔蒂斯小行星表面的碎石分布特征,对其形成与演化具有重要科学意义。使我国成为继美、欧之后第3个实现日-地L2点和继美、日、欧之后第4个实现小行星探测的国家。

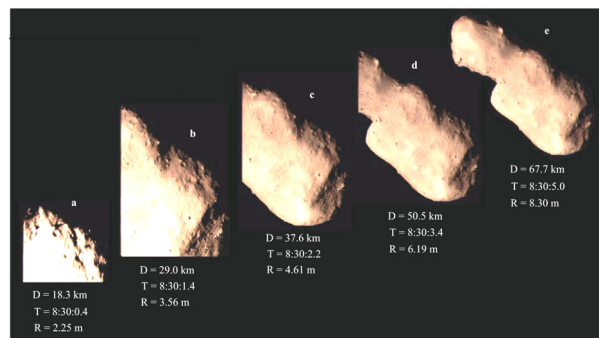


图3 “嫦娥二号”拍摄的图塔蒂斯小行星光学影像图^[19]

Fig. 3 Optical image of Toutatis asteroid taken by "Chang'e-2"^[19]

1.2 我国深空探测的发展

1.2.1 载人深空探测

随着深空探测的推进,各国载人深空探测逐渐提上日程^[20-21]。2021年6月16日,在全球空间探索大会期间,中国国家航天局和俄罗斯国家航天集团公司通过线上和线下混合方式,共同举办了国际月球科研站路线图全球网络论坛。在该论坛上,中、俄联合发布了《国际月球科研站路线图(V1.0)》和《国际月球科研站合作伙伴指南(V1.0)》^[22]。国际月球

科研站是指通过吸引可能的国际伙伴共同参与,在月球表面和/或月球轨道上建设可进行月球自身探索和利用、月基观测、基础科学实验和技术验证等多学科多目标科研活动的长期自主运行、远景有人参与的综合科学实验设施。

1.2.2 木星等行星的探测

在2021年6月12日的国家航天局举办新闻发布会上,我国首次火星探测任务工程总设计师张荣桥表示我国将进行火星取样返回和木星系探测。2021年6月17日,在国务院新闻办新闻发布会上,国家航天局副局长、探月工程副总指挥吴艳华表示我国的小行星探测、火星取样返回、木星系探测等工程任务也将按计划陆续实施。

1.2.3 小行星的取样返回和彗星环绕探测

2019年4月19日,国家航天局首次发布了《小行星探测任务有效载荷和搭载项目机遇公告》^[23],表示我国的小行星探测将通过一次发射实现一颗近地小行星取样返回和一颗主带彗星绕飞探测,并且明确指出了探测目标是近地小行星2016HO₃,探测任务是对这颗小行星先开展绕飞探测,随后择机附着于小行星表面,采集小行星样品后返回地球附近,释放返回舱将小行星表面样品送回地球,相关科研人员将其回收后送往实验室展开小行星成分及元素含量等研究。上述过程完成后,探测器经地球、火星借力,经历约7年时间飞行到达小行星带,对主带彗星133P开展绕飞探测。

2020年7月29日,国家航天局等七部门又发布《关于开展嫦娥七号和小行星探测科普试验载荷创意设计征集活动的通知》^[24],宣布了探月工程四期“嫦娥七号”任务和行星探测重大工程小行星探测任务正在启动实施的消息,并向全国的科研单位和大学等机构征求这些航天任务从某些方面的方案以及辅助探测计划等,说明我国的小行星探测计划已经启动,目前正处于任务筹备和探测器研制的阶段。

2 深空探测环境及其对航天器的危害

深空探测任务主要是对月球及月球以外的天体及其环境的探测。因此,深空探测任务主要包括月球和除地球以外的七大行星的探测,以及小行星和太阳系边缘的探测。与地球轨道航天器相比,深空探测任务可能会遭受更加恶劣的空间环境,并对航天器带来严重的威胁^[25]。

2.1 深空探测面临的太空环境

深空环境的主要特征是充满了高能量的混合空间辐射场包括极高真空的环境、存在着太阳连续发射的电磁辐射、爆发性的高能粒子辐射、稳定的等离子体流(称太阳风)和极端的温度及温度交变等^[26]。

深空环境中存在着极端的温度及温度交变环境,如火星环境温度低于-125℃,月球表面温度为-183~127℃,而金星大气的最高温度则高达500℃,小行星海神探测器要求的工作温度范围从-180~100℃。不同星体的温度如表1所示。

表1 不同星体的温度
Tab.1 The temperature of different stars

行星	温度/℃		
	平均值	最低	最高
水星	179	-183	427
金星	464	-45	500
月球	-	-180 ~ -160	130 ~ 150
火星	-57	-132	28
木星	-140 ~ -160	-	-
土星	-	-190 ~ -210	-140
天王星	~-176(表面温度)	-	-
海王星	-218(云顶温度)	-	-
冥王星	-238 ~ -228	-	-

太阳电磁辐射是航天材料的主要威胁。基于距离太阳的远近,不同的星体获得太阳辐射的数量存在较大差异,这就造成了不同星体表面的太阳辐射度差别巨大,如表2所示^[27]。

表2 不同星球的太阳总辐照度
Tab.2 The total solar irradiance of different planets

行星	太阳总辐照度/W·m ⁻²		
	平均值	近日点	远日点
水星	9116.4	14447.5	6271.1
金星	2611.0	2646.4	2575.7
地球	1366.1	1412.9	1321.6
火星	288.6	715.9	491.7
木星	50.5	55.7	45.9
土星	15.04	16.76	13.53
天王星	3.72	4.11	3.37
海王星	1.510	1.515	1.507
冥王星	0.878	1.571	0.560

由表2可知,水星的表面太阳辐照度大约是地球轨道1AU处太阳辐照度的6.67倍,而冥王星受到的太阳辐照度则为地球轨道1AU处的万分之六。这也就造成了不同轨道位置受到的太阳电磁辐射或紫外线辐射的差别。

深空辐射环境,尤其是木星辐射环境^[28],将对木星探测任务带来严重威胁,图4和图5分别是地球轨

道和木星轨道的电子和质子辐射环境的参数。

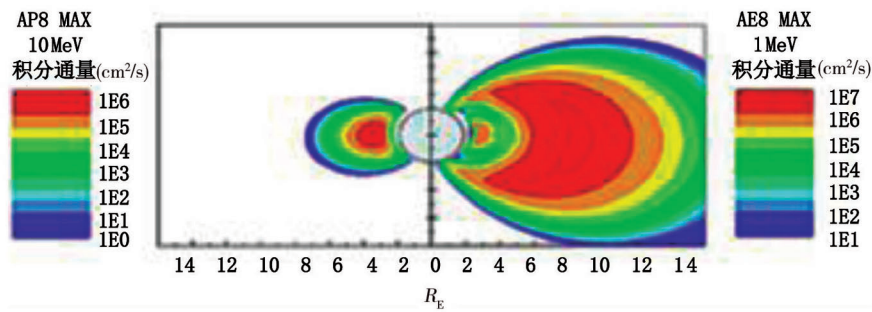


图4 地球轨道 ≥ 1 MeV电子和 ≥ 10 MeV质子积分通量等高线图^[28]

Fig. 4 Contour of the fluence of electrons larger than 1 MeV and protons larger than 10 MeV in the orbit of Earth^[28]

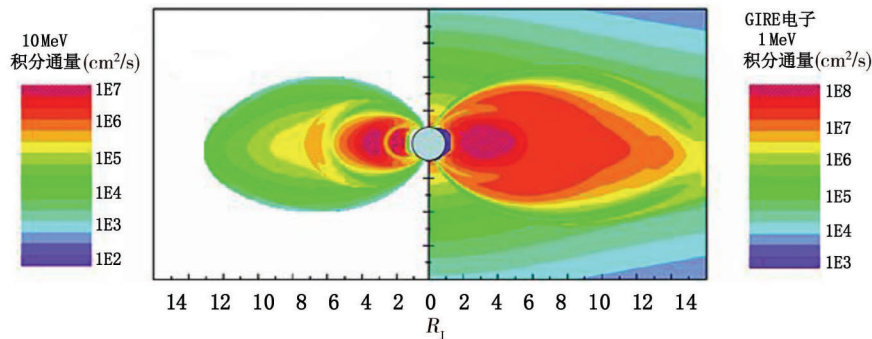


图5 木星轨道 ≥ 1 MeV电子和 ≥ 10 MeV质子积分通量等高线图^[28]

Fig. 5 Contour of the fluence of electrons larger than 1 MeV and protons larger than 10 MeV in the orbit of Jupiter^[28]

由图4和图5可知,木星轨道的质子和电子的通量分别比地球轨道的质子和电子通量要高一个数量级。因此,需要对深空探测器尤其是木星探测器的材料特别是外露功能材料、舱内材料^[29]和电子材料采用抗辐射加固措施,提高其抗辐射能力。

尘及尘暴是深空探测又一主要威胁。由“嫦娥五号”拍摄的图像也显示月面布满了尘土,如图6所示^[30]。而火星表面也沉积了厚厚的火星尘埃,火星大气中也充满着尘埃,它们都是火星岩石风化的产物,成分主要是硅酸盐($>60\%$),还有磁铁矿(1%)等其他成分。火星上稀薄干燥的大气和风,可以把尘埃从火星表面扬起,从而造成尘暴。尘暴可以是局部性的,持续时间一般为几周,区域性尘暴可以覆盖大片区域,而全球性尘暴在火星上几乎每年就发生一次,这种全球性的尘暴持续时间达几个月。全球性尘暴一般在火星近日点即火星南半球为夏季时从南半球爆发,届时,尘暴将吞没整个星球,致使尘埃悬浮在大气中。

此外,在不同行星上还存在特殊的大气环境,如金星有极稠密的大气层,表面的大气压约为地球的90倍,主要成分是 CO_2 (占97%以上)。火星上的大

气稀薄,主要成分是 CO_2 ,约占95%,表面大气压为750 Pa。

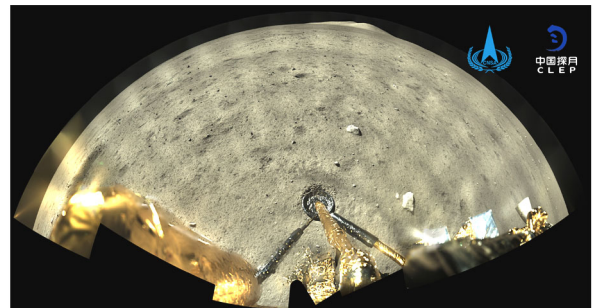


图6 “嫦娥五号”着陆器和上升器组合体着陆后全景相机环拍成像^[30]

Fig. 6 Panoramic camera circle imaging of the "Chang'e-5" lander and ascender combination after landing^[30]

2.2 深空探测对航天器的影响

深空探测所面临的极端环境包括金星、水星的极端温度,金星的酸性大气,月球和火星的尘与尘暴,木星和土星的强辐射,小行星及太阳系边缘长期探测所面临的长期辐射环境以及极端低温环境等将对探测器材料和工艺带来严峻挑战,造成其功能退化甚至失效。深空环境对航天器的影响如表3所示。

表3 深空环境对航天器的影响

Tab. 3 The impact of deep space environment on spacecraft

深空环境	深空探测任务	对航天器的影响
极端温度	极端高温	地内行星如水星、金星等
	极端低温	地外行星如天王星、海王星等
尘与尘暴	强太阳电磁辐射	地内行星
	星表尘	月球、火星
	尘暴	火星
深空辐射	行星捕获辐射带	木星、土星
	长期辐射(银河宇宙线、太阳宇宙线)	小行星及太阳系边缘探测
	诱导辐射环境(伽马射线、中子)	月球表面、火星表面
	酸性大气	金星
	微流星体	小行星、柯伊伯带

3 深空探测对材料和工艺的总体要求

未来深空探测任务具有周期长、质量大、体积大、环境恶劣、花费高等特点,尤其是载人深空探测,更将面临与航天员衣食住行相关的一系列问题,比如基地建设、能源获取与利用、着陆缓冲等。因此,深空探测任务对航天材料的性能和功能提出了一系列较高的需求。

3.1 材料及结构的轻量化

基于深空探测任务的周期长、任务多、质量大、花费高、面临的环境恶劣等特点,在性能满足工程任务要求的前提下,希望所采用的材料具有较轻的质量,进而可以满足发射运载的需求和花费较低的费用。因此,对航天器结构材料提出了高性能、轻量化的需求。

3.2 高效的防热与热控制

热控制是航天器尤其是深空探测器非常重要的一项工作,尤其是地内行星和地外行星探测分别面临着极端高温和极端低温的环境,均需要具有较好的热防护和热控制,包括被动防热和主动热控制。这就要求航天器热控材料在深空极端环境下,仍然具有较好的防热特性或热控制性能。此外,还需要考虑深空再入过程中,可能面临的极端高温问题。

3.3 可靠的辐射防护与耐辐射能力

深空探测的辐射防护主要来自于三方面的需求:一是深空探测具有在轨周期长、累积辐射剂量大的特点;二是一些行星具有较地球更强的捕获辐射带,具有远比地球轨道恶劣的辐射环境,如木星辐射带;三是载人深空探测需要开展人的长期在轨辐射

防护。因此,对长期深空探测任务,需要材料具有更好的辐射防护能力或者具有更强的耐辐射损伤能力。

3.4 提供可靠持续的能源

基于深空探测的长周期和极端的太空环境,需要能够对深空探测器,尤其是长寿命探测器提供持续不断的能源。不论是核能源,还是光电转换能源,均需要开发新型高费效比能源材料,并对其能源装置和结构材料的在轨可靠性提出了较高的要求,以保证深空任务不会因为能源不足而中断工作。

3.5 具有较强的耐腐蚀性能

在地球的低地球轨道,原子氧具有较强的氧化性,需要对航天器外露材料的抗原子氧侵蚀性进行关注。而在深空探测任务中,有些行星轨道或星体表面具有腐蚀性气体,如金星表面具有SO₂气体,可对航天器外露材料带来酸性腐蚀。针对有人参与的载人深空任务,航天员的长期参与可能带来细菌、潮湿等环境,这些环境具有一定的腐蚀性,也可以对载人深空舱内材料带来腐蚀。因此,要求相关任务的深空探测器外露材料具有较高的耐腐蚀性能。

3.6 具有较好的抗尘与尘暴损伤性能

除了小行星带或微流星体之外,某些星体表面具有尘和尘暴,如月球表面具有大量的月尘、火星表面具有火星尘和尘暴,可对深空探测器外露材料和器件带来严重威胁,也对深空航天员的外行走用航天服材料带来严重威胁,可以造成材料及结构的摩擦磨损、卡死等,也可以造成关键光学材料或器件性能下降。因此,需要深空探测器或深空航天服的

关键材料及其结构具有较好的抗尘及尘暴损伤的能力。

3.7 能够实现在轨组装和制造

由于深空探测对结构质量非常敏感,而且未来的深空探测器寿命长,尤其是深空基地外包络直径较大,可达10 m甚至百米量级。若通过地面运载发射,则需要超大运载火箭,实现的难度极高,因此,需要深空基础设施具有能够在轨组装的能力。同时,在长期的深空基地任务过程中,对某些关键部件需要具有在轨制造的能力。

4 深空探测对航天材料及工艺的需求

基于深空探测环境对航天器的危害和深空探测对航天材料及工艺的总需求,需要进一步开展深空探测用航天材料和工艺的研究。

4.1 轻质结构机构材料

以载人登月和月球基地建设为代表的深空探测任务和大型空间基础设施的建设,要求运载器的承载能力大幅提升。为此,我国开发了以长征五号为代表的大推力运载火箭,但面对传统的航天器结构机构,现有的运载能力仍难以满足要求,或者费用太高。例如在月面发射1 kg质量,在地面需要4.5 kg甚至更多的质量。因此,在基于深空的复杂恶劣环境和大尺寸的空间基础设施建设,在满足基本功能性能要求的前提下,需要大大降低深空结构机构的质量。为此,可以从以下几个角度开展工作。

4.1.1 提高合金类材料的质量和强度

常用航天器的铝合金、镁合金、钛合金等合金类材料^[31-32];一方面开发新型配比的合金材料,如新型2195铝锂合金,具有高模量,可达78 GPa,质量减轻10%~15%,结构刚度提高15%~20%等;另一方面提高镁合金、钛合金等的抗拉强度和比强度等性能,研发超高强度镁合金和钛合金等,如将镁合金的比强度提高大于450 MPa/g·cm⁻³甚至更高。

4.1.2 研制高性能非金属基或金属基复合材料

研制高性能非金属基或金属基复合材料:一方面能够获得高比模量、比强度等力学性能;另一方面也能提高其导热性能以及温度环境适用性,并兼顾低密度、可加工性等性能。例如,氮化硼陶瓷基复合材料既有良好的强度,又具有很高的防热性能^[33]。我国空间站“天和”核心舱电推进系统中的霍尔推力器腔体采用的氮化硼陶瓷基复合材料,该材料具备低密度、高强度、抗抗震、耐溅射、易加工、绝缘性好等优点,满足了推力器对陶瓷腔体材料的要求。“天问一号”火星探测器上也将新型的SiC增强铝基复合材料用于构件研制中,实现了质量轻、强度高、刚性好、宽温度范围下尺寸稳定的要求。

4.1.3 结构功能一体化设计

针对航天器结构,尤其是复杂结构,尽可能实现结构功能的一体化设计,减少联接部分和部件,进而达到减少质量、增加强度的目的。实现质量和部件数量双双减少30%以上等。针对深空探测器结构大底进行防热承力一体化设计^[34],以C/C-SiC复合材料作为防热层,以梯度隔热材料为隔热层,采用耐高温非金属螺钉机械连接辅以胶接的方式组合各部件,在满足强度要求和温度要求的前提下,质量较传统热防护系统方案减小约34%。

4.1.4 采用柔性展开式结构

对深空探测器或大型深空基础设施,可以考虑多采用柔性展开式结构来实现其结构功能,如采用大型柔性太阳能电池阵、柔性展开式月球基地模块等,可以达到质量轻、结构大等目标,火星漫步者充气太阳能电池阵^[35]收拢状态下体积非常小,而展开后则可以获得大面积的太阳阵,如图7所示。但要求其在轨展开性能、抗辐射能力、结构尺寸的稳定性和可加工性等应该满足要求。“天问一号”探测器搭载了“基于形状记忆聚合物智能复合材料结构的可展开柔性太阳能电池系统”,包括形状记忆复合材料锁紧释放机构、形状记忆聚合物复合材料可展开梁和柔性太阳能薄膜电池。“天和”核心舱也采用了大面积可展收柔性太阳能电池翼,这为下一步深空探测用柔性展开结构奠定了可靠的实践保障。

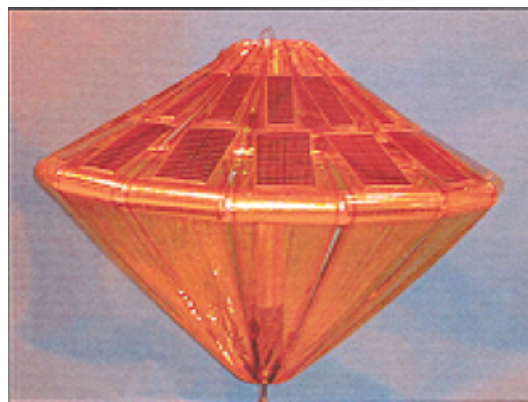


图7 火星漫步者充气太阳能电池阵^[35]

Fig. 7 Mars rover inflatable solar array^[35]

4.2 高效热控制材料

高效的热控制材料包括被动热防护材料和主动热控制材料是深空探测任务中的关键材料^[36-37]。

4.2.1 被动热控制材料

被动热防护材料主要为各类热控涂层,如漆类热控材料、玻璃基热控材料、薄膜基热控材料、阳极氧化热控材料和再入热烧蚀材料等。从密度分类,则可以分为低密度防热(烧蚀)材料、中密度防热材料等。针对深空探测任务,要求其能够实现在极端

低温和极端高温下具有合适的太阳吸收比和热发射率,同时具有良好的空间环境适应性。我国在低密度烧蚀隔热材料^[38]如蜂窝增强低密度材料、新型防隔热一体化材料、轻质烧蚀材料等先进防热复合材料研制方面,取得了突破性进展,并成功应用在以月地高速再入返回飞行器、“嫦娥五号”月球探测器为代表的深空探测任务中^[39]。

比如,针对月球返回轨道高热流峰值、高焓值、高气动剪切、长时加热、跳跃式弹道的二次烧蚀等复杂热环境,航天材料及工艺研究所开发出蜂窝增强FG4、FG5、FG7和HC5材料,分别用在不同热流环境区域,如图8所示^[40]。

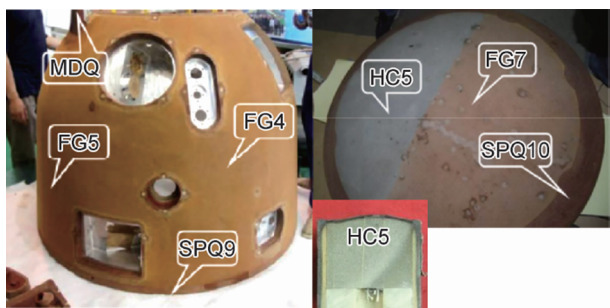


图8 月球轨道返回器LAC分布及HC5烧蚀后横截面^[40]
Fig. 8 Distribution of LAC in lunar orbiter and the cross section of HC5 after ablating^[40]

其中,蜂窝增强低密度烧蚀隔热材料密度约为 0.36 g/cm^3 ,可承受 1.5 MW/m^2 的热流环境,可耐受火星大气以 CO_2 为主的特殊气氛气动加热。针对火星探测,“天问一号”使用了三元长纤维组成的SPQ纤维布增强体系,并将轻质填料引入到连续纤维增强的预浸料中,实现了对传统连续纤维增强烧蚀隔热材料的轻质化,密度约为 0.9 g/cm^3 ,兼顾了耐烧蚀和承载能力。

值得关注的是,气凝胶热控材料在我国深空探测任务中取得了重要的应用。据文献^[41]报道,“天问一号”工程任务一共使用了两种气凝胶材料:一是着陆发动机周围的隔热组件,可将温度超过 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 的发动机热流有效控制到可接受范围;二是火星车表面的气凝胶保温板,可以保证火星车在 $-130\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境正常工作。这两种气凝胶不但隔热效果好,而且其密度只有大约 15 mg/cm^3 ,是同等体积下钢的1/500、铝的1/180、水的1/60。

未来,面向深空探测的发展需求和结构机构轻量化的要求,被动隔热材料的轻质化、功能多样化、集成化是发展的重要方向。

4.2.2 主动热控制材料

主动热控制材料主要包括热管材料、智能热控材料、主动烧蚀冷却材料等。基于相变和毛细作用

的高效热管材料在我国航天器舱内有着大量的应用,但针对未来的大型深空航天器和极端温度环境,如何实现高效热控制,是未来热管技术的发展方向。如在“嫦娥五号”着陆上升组合体的研制过程中,通过采用“泵驱小型单相流体回路热总线+水升华器”的设计方案^[42],将组合体大部分舱内设备热耗耦合至泵驱小型单相流体回路热总线上,着陆器辅助散热面+上升器主散热面为主散热通道,再结合水升华器辅助热沉,共同完成组合体的热收集、热传输与热排散功能。通过试验验证表明,设备最高温度也不超过 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 。

同时,作为具有智能特性的各类智能热控材料与器件,通过基于电致变色、热致变色或者热开关(图9),实现热的自动调节是未来的重点发展方向^[43-45],但是距离工程应用还有很大差距。因此,如何实现智能热控材料与器件的工程化应用,如何通过改进工艺技术,提高其在轨的空间环境适应性是重要的研究方向。

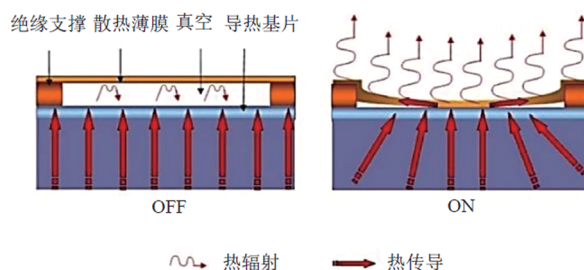


图9 静电开关辐射器(ESR)结构与工作原理图^[44]
Fig. 9 Principle of electrostatic switchable radiator (ESR)^[44]

而基于不同原理的主动降温冷却技术在未来的深空探测器再入过程中有望发挥重要作用^[46-47],但采用材料的种类和主动冷却结构的加工工艺是进一步发展的方向,如图10所示。

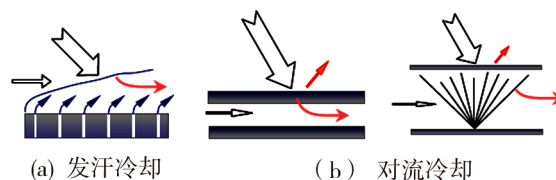


图10 主动冷却热防护方法^[46]
Fig. 10 Active cooling thermal protection method^[46]

4.3 组合辐射防护及耐辐射材料

深空探测过程中,由于失去了地磁场的防护,航天器将直接暴露于太阳宇宙射线或银河宇宙射线的辐射环境下,尤其是存在星体辐射带的深空探测任务如木星探测,其辐射环境比较恶劣。因此,需要从两个方面开展抗辐射材料及辐射防护材料的研究

工作。

4.3.1 耐辐射材料

深空探测器材料,尤其是光学类材料,在深空辐射环境下,将发生电离损伤和位移损伤,造成其光学性能和光电性能退化,如玻璃窗口的透过率降低、成像模糊等,严重影响深空探测任务的执行。为此,需要从材料研制的角度,加强材料的组分设计和工艺研究,提高材料的抗辐射能力。

4.3.2 辐射防护材料

深空探测器在轨期间将遭受来自于太阳宇宙射线、银河宇宙射线和星体表面辐射如反射中子等的持续不断的辐射,不但引起航天器材料的损伤,也引起航天器内部电子电路和航天员的辐射损伤。为此,需要加强敏感电子电路和航天员的辐射防护。众所周知,利用质量屏蔽是防护高能粒子的有效手段,但达到一定屏蔽质量以后,由于次级辐射的存在,辐射防护效率大大降低。因此,一方面,可以通过多种材料复合来提高单位面密度材料的防护性能;另一方面,可以通过高原子序数和低原子序数材料的组合来实现对高能带电粒子和不带电中子的组合防护^[48]。但如何通过材料的成分设计和工艺设计来实现单位面密度下的更高效的辐射防护是未来重要的研究方向^[49]。当然,也可以通过电场、磁场或电磁场的组合来实现带电粒子的偏转,达到辐射防护的目的,但同样需要对拟采用的电磁材料进行设计和研究^[50]。

4.4 耐腐蚀材料

深空探测任务中的腐蚀主要来自于行星的腐蚀性气体和有人参与的酸性腐蚀两个方面。

4.4.1 行星表面或轨道的腐蚀性气体

有些行星表面或轨道上存在腐蚀性气体,如金星的 SO_2 气体^[51],这些腐蚀性气体可对航天器外露材料或器件产生化学反应,造成其材料腐蚀,性能下降甚至失效。据文献^[52]报道,NASA目前正在载人金星任务研究,名为“高空金星运行概念”(HAVOC),计划利用飞艇进行探测。该任务并不是让人类登陆不适宜居住的行星表面,而是利用金星稠密的大气层作为探索基地。但是,金星大气层中含有硫酸,形成了由硫酸液滴组成的薄雾,而且,还有飞往金星过程中的辐射,以及再入过程中的高温等,都会对材料带来严重影响,需要开展充分的腐蚀与辐射的防护技术研究。

4.4.2 有人参与的酸性腐蚀

在有人参与的深空任务执行过程中,尤其是在航天员生活的区域,由于存在水汽、合适的温度以及氧气等,可能造成大量的细菌繁殖。这些细菌繁殖

过程中的排泄物可以造成航天员生活舱内的金属板、水管等发生腐蚀^[53]。为此,如何开展航天员生活舱等的抗细菌材料的研制和耐腐蚀材料的研制是未来载人深空探测任务的重要方向。

俄罗斯专家曾研究了俄罗斯1986-2000载人航天中微生物的污染问题^[54],探讨了微生物对空间站设备上铜线、钛及橡胶的侵蚀情况,俄罗斯空间站烟感探测器真菌生长严重(图11),纤维板也受到霉菌侵蚀而污染严重(图12)。此外,载人深空站中的微生物在空气或水中的繁殖与传播,可能造成空气或者水循环系统的堵塞,给深空站生命保障系统带来威胁。如果空气中的微生物进入航天员的呼吸系统,则还可能引发疾病。



图11 俄罗斯空间站烟感探测器真菌生长情况^[54]

Fig. 11 Fungal-contaminated Russian smoke detector^[54]



图12 空间站上FGB纤维板受到霉菌侵蚀污染的照片^[55]

Fig. 12 Fabric panel in FGB potentially contamination with fungus^[55]

因此,针对未来有人参与的深空探测,需要充分考虑微生物的控制以及舱内材料的抗菌抑菌的问题。

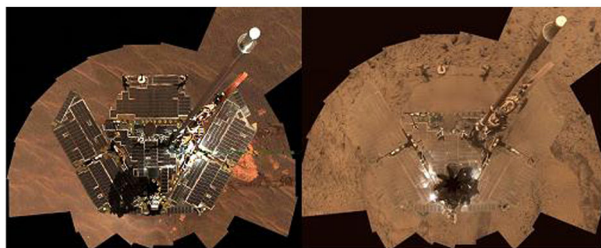
4.5 耐尘与尘暴材料

月球和火星均存在各种尺寸的尘及颗粒^[56-59],火星表面还存在尘暴。

尤其是火星,由于季节的存在和大气的存在,经常会出现各种尘暴:一方面是覆盖在航天器的表面,引起遮挡效应;另一方面,尘在探测器表面的流动和

摩擦,可以造成机械结构的卡死、关键材料的摩擦磨损,使其光学性能下降^[60]。

最终,尘暴中的尘埃颗粒降落回火星表面,导致航天器损伤或功能无法实现。勇气号探测器在火星表面就曾被火星尘覆盖,如图13所示^[61]。



(a) 覆盖前 (b) 覆盖后

图13 尘埃覆盖前后的勇气号^[61]

Fig. 13 Valor before and after dust cover^[61]

为此,在执行存在尘和尘暴环境的深空探测任务过程中,应该从以下方面开展耐尘与尘暴的材料研究。

4.5.1 防尘材料

防尘材料主要包括各类防尘的密封材料,即在微小尘埃环境中,尽量避免尘埃颗粒进入结构机构中。

4.5.2 抗摩擦材料

抗摩擦材料包括耐摩擦润滑材料,即各类机构结构关节部位的润滑材料应具有耐尘埃摩擦的能力。其次,对表面材料如太阳能电池阵,如何减少由于尘暴冲击而造成光学性能的降低是重要的工作方向。

4.5.3 抗粘附材料

抗粘附材料主要从航天员和航天器两个维度来考虑:一方面,航天员出舱行走过程中,各类细小的尘可能在航天服的各个位置粘附,有些甚至渗透进入航天服内部,从而对航天员带来严重威胁;另一方面,航天器材料的抗粘附即航天器外露材料具有自洁净特性,一是尘埃颗粒不容易在航天器表面粘附,二是航天器表面材料可以通过自身特性或者工艺手段使表面覆盖的尘粒去除。

4.6 高可靠能源材料

深空探测任务,尤其是长寿命、多载荷和多任务,对空间能源带来了新的需求,在相同的质量下,能够实现更高的能源供应,是深空探测任务的迫切需要。不论是高性能太阳能电池,还是新型先进的核能源,都需要开发出新型高费效比的能源新材料。

4.6.1 新型太阳能电池材料与工艺

现有的太阳能电池主要是三结或多结砷化镓太阳能电池,未来,开发能够实现单位质量发电效率更高

的太阳能电池,如柔性薄膜太阳能电池等新型电池,或者利用新的工艺技术,提高已有太阳能电池的发电效率,均是深空探测的发展方向^[62]。美国空军实验室(AFRL)研制的The Roll-Out Solar Array(ROSA)薄膜太阳能电池阵,见图14^[63],已经成功应用于国际空间站,并实现了15 kW的发电功率。在未来深空探测任务中,如何通过太阳能电池的材料和工艺改进,实现更高的发电效率和更好的空间环境适应性,是重要的发展方向。



图14 ROSA 薄膜太阳能电池阵地面展开状态^[63]

Fig. 14 Ground deployment state of ROSA thin film solar array^[63]

4.6.2 新兴核能源材料及工艺

随着未来深空探测的推进,小型的核能源越来越受到重视。在开发空间用小型核能源的过程中,从核能源材料、核能防护材料、核能结构材料等不同的维度,均需要从材料本身和加工工艺两个方面加强工程应用研究^[64]。比如,利用放射性同位素温差发电器直接将放射性同位素的衰变热转化为电能,则需要对²³⁸Pu的制备生产能力和热源封装工艺等核心技术开展研究^[65];基于空间热离子能量转换技术的热离子反应堆电源,则要在高强度W-Nb单晶合金发射极材料、低功函数接收极材料的开发上做大量工作^[66]。

4.7 3D/4D打印技术

深空探测任务过程中,尤其是载人深空探测任务,可能会在轨面临新的需求。这时,如果通过地球发射任务来解决则需要更长的时间和花费。随着3D和4D打印技术的发展,基于在轨打印技术,来实现特定功能的结构的制备是发展的重要方向。这就需要航天器材料具有可在轨制造的能力^[67]。

3D打印技术,通过连续的物理层叠加,逐层增加材料来生成三维实体的技术,是“增材制造”技术的主要实现方法,聚合物、陶瓷、金属等材料均可以用

于3D打印^[68-70]。3D打印通过实现复杂结构的制造,克服了利用传统加工制备的工艺复杂、连接点多、可靠性差等缺点。目前,3D打印技术已经在国际空间站得到了验证,并且成功制备应用于航天器火箭发动机喷嘴等零部件,见图15^[71]。

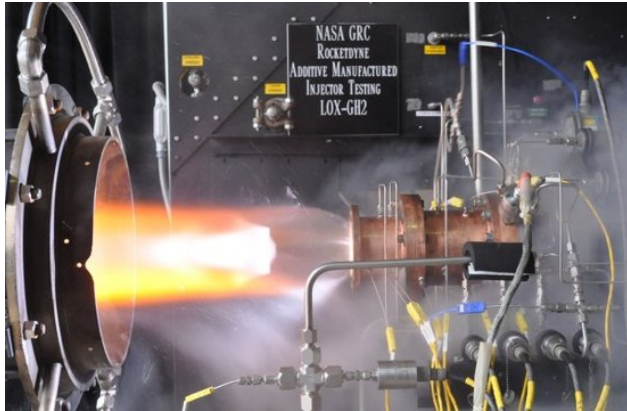


图15 NASA进行3D打印火箭发动机的首次点火测试^[71]
Fig. 15 NASA's first ignition test of 3D printing rocket engine^[71]

4D打印技术是将智能技术引入3D打印中,利用在轨激励实现3D打印结构在轨展开,见图16^[72-73]。相较于3D打印,4D打印是3D打印结构及材料在形状、性能和功能方面的有针对性演变,具有能够实现自组装、多功能和自我修复的特性,有望在空间天线、深空基地建设等领域发挥重要的作用。

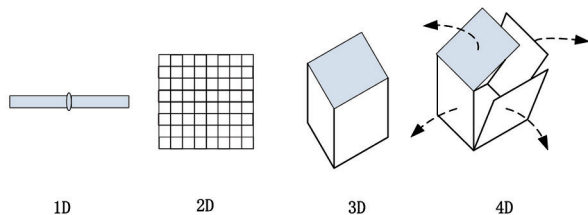


图16 4D打印概念的示意图^[73]

Fig. 16 An illustration of the concept of 4D printing^[73]

5 结束语

我国深空探测任务已经取得了月球探测的“三步”走目标,实现了月球的取样返回,也实现了“天问一号”火星探测任务的圆满成功。未来,我国还将进一步开展载人登月任务、木星等行星探测任务以及小行星和彗星探测任务。面向未来的深空探测面临的长周期、极端温度、强辐射等严酷深空环境,需要从材料和工艺两个角度,开展轻质结构机构材料、热控和热防护材料、辐射防护和耐辐射材料、耐腐蚀材料、耐尘与尘暴材料、高可靠能源材料、3D/4D打印技术等开发,为实现深空探测的轻量化、高效热控制、提供可持续能源、抗辐射等提供支持。

参考文献

[1] 张颖一,张伟. 国外载人深空探测现状及发展趋势分析[J]. 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第5期

析[J]. 中国航天,2019(11):54-59.

ZHANG Yingyi, ZHANG Wei. Analysis of the status and development trend of foreign manned deep space exploration[J]. Aerospace China,2019(11):54-59.

[2] 范唯唯,韩淋,王海名,等. 俄罗斯未来金星探测任务特点浅析[J]. 中国航天,2020(10):47-52.

FAN Weiwei, HAN Lin, WANG Haiming, et al. Analysis of the characteristics of Russia's future Venus exploration missions[J]. Aerospace China,2020(10):47-52.

[3] National Space Exploration Campaign Report. Pursuant to Section 432 (b) of the NASA Transition Authorization Act of 2017 (P. L. 115-10). September 2018.

[4] <https://www.nasa.gov/gateway/overview>.

[5] 孙泽洲,孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报,2015,47(6):785-791.

SUN Zezhou, MENG Linzhi. Current situation and sustainable development trend of deep space exploration in China [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2015, 47(6):785-791.

[6] 于登云. 中国探月工程发展及对空间环境与材料研究的需求[J]. 航天器环境工程,2010,27(6):677-681.

YU Dengyun. China's lunar exploration program and researches on space environment and materials [J]. Spacecraft Environment Engineering,2010,27(6):677-681

[7] 吴伟仁,刘继忠,唐玉华,等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报,2019,6(5):405-416.

WU Weiren, LIU Jizhong, TANG Yuhua, et al. China Lunar exploration project [J]. Journal of Deep Space Exploration,2019, 6(5): 405-416.

[8] 栾恩杰. 中国的探月工程——中国航天第三个里程碑[J]. 中国航天,2007(2):3-7.

LUAN Eenjie. China's Lunar Exploration Program—the third miles tone for China's space industry [J]. Engineering Science, 2007(2): 3-7.

[9] 于登云,吴学英,吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述[J]. 深空探测学报,2016,3(4):307-314.

YU Dengyun, WU Xueying, WU Weiren. Review of technology development for Chinese lunar exploration program [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4):307-314.

[10] 李春来,刘建军,任鑫,等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图[J]. 中国科学:地球科学,2010,40(3):294-306.

LI Chunlai, LIU Jianjun, REN Xin, et al. The global image of the Moon obtained by the Chang'E-1: data processing and lunar cartography[J]. Science in China (Series D), 2010, 40(3):294-306.

[11] 欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果[J]. 自然杂志, 2013,35(6):391-395.

OUYANG Ziyuan. Chang'E-2 preliminary results [J]. Chinese Journal of Nature,2013,35(6):391-395.

- [12] 吴伟仁,于登云.“嫦娥三号”月球软着陆工程中的关键技术[J]. 深空探测学报,2014,1(2):105-109.
- WU Weiren, YU Dengyun. Key technologies in the Chang'e-3 soft-landing project [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(2):105-109.
- [13] 吴伟仁,王琼,唐玉华,等.“嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J]. 深空探测学报,2017,4(2):111-117.
- WU Weiren, WANG Qiong, TANG Yuhua, et al. Design of Chang'E-4 lunar far side soft-landing mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2):111-117.
- [14] 吴伟仁,于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报,2014,1(1):5-17.
- WU Weiren, YU Dengyun. Development of deep space exploration and its future key technologies [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.
- [15] 张玉花,王献忠,褚英志,等. 我国首次自主火星探测任务中环绕器的研制与实践[J]. 上海航天,2020,37(5):1-9.
- ZHANG Yuhua, WANG Xianzhong, CHU Yingzhi, et al. Development and practice of the Orbiter in China's First Mars exploration mission[J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(5):1-9.
- [16] <http://www.cnsa.gov.cn/n6759533/c6812126/content.html>
- [17] 吴伟仁,崔平远,乔栋,等. 嫦娥二号日地拉格朗日L2点探测轨道设计与实施[J]. 科学通报,2012,57(21):1987-1991.
- WU Weren, CUI Pingyuan, QIAO Dong, et al. Design and performance of exploring trajectory to Sun-Earth L2 point for Chang'E-2 mission[J]. Science China, 2012, 57(21):1987-1991.
- [18] 刘磊,吴伟仁,唐歌实,等.“嫦娥二号”后续小行星飞越探测任务设计[J]. 国防科技大学学报,2014,36(2):13-17.
- LIU Lei, WU Weiren, TANG Geshi, et al. Design of an asteroid flying-by mission for Chang'E-2 [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(2):13-17.
- [19] http://www.pmo.ac.cn/xwdt2019/kyjz2019/201909/t20190915_5383987.html
- [20] MARTINEZ R, GOODLIFF K, WHITLEY R. ISECC Global exploration roadmap: A stepwise approach to deep space exploration, 2013 [C]. AIAA Space 2013 Conference and Exposition.
- [21] 中国科学院. 中国学科发展战略:载人深空探测[M]. 北京:科学出版社,2016.
- Chinese Academy of Sciences. Chinese subject development strategy: manned deep space exploration [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [22] <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6812157/content.html>
- [23] <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6805886/part/6780392.pdf>
- [24] <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6809938/content.html>
- [25] 沈自才,代巍,白羽,等. 载人深空探测任务的空间环境工程关键问题[J]. 深空探测学报,2016,3(2):99-107.
- SHEN Zicai, DAI Wei, BAI Yu, et al. Key problems of space environmental engineering for manned deep space exploration mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2):99-107.
- [26] 焦维新. 未来的深空探测与空间环境模拟[J]. 航天器环境工程,2018,35(2):103-110.
- JIAO Weixin. Future deep space exploration and related space environmental simulation [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(2):103-110.
- [27] ASTM E490-00a:2006, Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables[S]
- [28] GARRETT H B. Overview of the Jovian environment. california institute of technology pasadena [C]// CA 91109. Presentation at the OPFM Instrument Workshop, June 3-5, 2008.
- [29] 王建昭,田岱,张庆祥,等. 木星环绕探测任务中的内带电风险评估[J]. 深空探测学报,2017,4(6):564-570.
- WANG Jianzhao, TIAN Dai, ZHANG Qingxiang, et al. Internal charging evaluation in Jupiter exploration mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(6):564-570.
- [30] <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758842/c6810698/content.html>
- [31] 李劲风,郑子樵,陈永来,等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用[J]. 宇航材料工艺,2012,42(1):13-19.
- LI Jinfeng, ZHENG Ziqiao, CHEN Yonglai, et al. Al-Li alloys and their application in aerospace industry [J]. Aerospace Materials&Technology, 2012, 42(1):13-19.
- [32] 赵云鹏,曾福明,周志勇,等. 新型铝合金的发展及其在密封舱结构上的工程应用[J]. 载人航天,2016,22(3):302-307.
- ZHAOYunpeng, ZENGFuming, ZHOUZhiyong, et al. Development and potential applications of advanced aluminum alloy in spacecraft pressurized cabin [J]. Manned Space Flight, 2016, 22(3):302-307.
- [33] 高龙飞,柴笑笑,马君毅,等. 石英纤维增强氮化硼陶瓷基复合材料制备及性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(10):101-104.
- GAO Longfei, CHAI Xiaoxiao, MA Junyi, et al. Preparation and properties of quartz fiber reinforced boron nitride ceramic matrix composites [J]. Composites Science and Engineering, 2020(10):101-104.
- [34] 黄文宣,邱慧,刘峰,等. 深空探测器防热承力一体化大底结构研究[J]. 航天返回与遥感,2019,40(6):19-25.
- HUANG Wenxuan, QIU Hui, LIU Feng, et al. Research on spacecraft thermal protection structure [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 40(6):19-25.

thermal-structural integrated heat shield structure for deep space explorer [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(6):19-25.

[35] CADOGANAND D P, LIN J K, Inflata blesol array technology[R]. AIAA99-1075

[36] 王筠,杨云华,冯志海. 深空探测用热防护材料的现状及发展方向[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(5):1-10.

WANG Yun, YANG Yunhua, FENG Zhihai. Current status and further trend of thermal protection materials for deep space exploration[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013, 43(5):1-10.

[37] 邢亚娟,孙波,高坤,等. 航天飞行器热防护系统及隔热材料研究现状[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(4):9-15.

XING Ya Juan, SUN Bo, GAO Kun, et al. Research status of thermal protection system and thermal protection materials for aerospace vehicles[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2018, 48(4):9-15.

[38] 程海明,洪长青,张幸红. 低密度烧蚀材料研究进展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(5):1-11.

CHENG Haiming, HONG Changqing, ZHANG Xinghong. An overview on low-density ablators [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(5):1-11.

[39] 董彦芝,刘峰,杨昌昊,等. 探月工程三期月地高速再入返回飞行器防热系统设计与验证[J]. *中国科学:技术科学*, 2015, 45(2):151-159.

DONG Yanzhi, LIU Feng, YANG Changhao, et al. Design and verification of the TPS of the circum lunar free return and reentry flight vehicle for the 3rd phase of Chinese lunar exploration program[J]. *Science China: Technological Science*, 2015, 45(2):151-159.

[40] 冯志海,师建军,孔磊,等. 航天飞行器热防护系统低密度烧蚀防热材料研究进展[J]. *材料工程*, 2020, 48(8):14-24.

FENG Zhihai, SHI Jianjun, KONG Lei, et al. Research progress in low-density ablative materials for thermal protection system of aerospace flight vehicles [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(8):14-24.

[41] https://www.sohu.com/a/467442050_777213.

[42] 宁献文,蒋凡,张栋,等. 月球无人采样返回探测器一体化热控制方案[J]. *航天器环境工程*, 2017, 34(6):598-603.

NING Xianwen, JIANG Fan, ZHANG Dong, et al. An integrated thermal management scheme for lunar robotic sampling and return probe [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(6):598-603

[43] 金海波,凌晨,李静波. 航天器用可变发射率热控器件的研究进展[J]. *深空探测学报*, 2018, 5(2):188-200.

JIN Haibo, LING Chen, LI Jingbo. Development of variable-emittance thermal control technology [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(2):188-200.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第5期

[44] 曹生珠,陈学康,吴敢,等. 航天器用可变发射率热控器件[C]//空间材料及其应用技术学术交流会. 北京:中国空间技术研究院, 2011.

CAO Shengzhu, CHEN Xuekang, WU Gan, et al. Spacecraft variable emittance thermal control devices [C]//Proceedings of the Space Materials and Applied Technology Academic Exchange. Beijing:China Academy of Space Technology, 2011.

[45] 闫璐,王孝,曹韞真,等. 基于二氧化钒的辐射率可调涂层设计[J]. *宇航材料工艺*, 2016, 46(3):21-25.

YAN Lu, WANG Xiao, CAO Yunzhen, et al. Structure design of VO₂-based multilayer structure with tunable emittance [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2016, 46(3):21-25.

[46] 向树红,商圣飞,沈自才,等. 高超声速气膜冷却技术研究进展及发展方向[J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(3):1-10.

XIANG Shuhong, SHANG Shengfei, SHEN Zicai, et al. Research progress and development direction of hypersonic film cooling technology[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, 50(3):1-10.

[47] 周印佳,张志贤. 航天器可重复使用热防护技术研究进展与应用[J]. *航天返回与遥感*, 2019, 40(5):27-40.

ZHOU Yinjia, ZHANG Zhixian. Research progress and applications of reusable thermal protection technology for spacecraft [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(5):27-40.

[48] 沈自才,夏彦,杨艳斌,等. 航天器空间辐射防护材料与防护结构[J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(2):1-7.

SHEN Zicai, XIA Yan, YANG Yanbin, et al. Protection of Materials and Structures From Space Radiation Environments on Spacecraft [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, 50(2):1-7.

[49] 胡鉴航,冯颖,韩建伟,等. 电离总剂量复合屏蔽模拟仿真及验证试验[J]. *空间科学学报*, 2014, 34(2):180-185.

HU Jianhang, FENG Ying, HAN Jianwei, et al. Simulation and validation of composite shielding for total ionizing dose [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(2):180-185

[50] 蔡明辉,杨涛,韩建伟. 载人深空探测磁场主动辐射防护技术研究[J]. *深空探测学报*, 2019, 6(2):165-172.

CAI Minghui, YANG Tao, HAN Jianwei. Study of active magnetic radiation shielding technology for manned deep space exploration [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(2):165-172.

[51] NASA正在进行载人金星任务的概念性研究[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(5):65.

NASA is conducting conceptual research on the manned Venus mission [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(5):65.

[52] NASA正在进行载人金星任务的概念性研究[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(5):65.

- [53] GRIGORIEV A I, POTAPOV A N. Vital biomedical problems of exploration of the far space [R]. IAC-02-G. 5. 01. 1-8
- [54] MACATANGAY A V. Impacts of microbial growth on the air quality of the international space station [R]. AIAA 2010-6069.
- [55] NOVIKOVA N D. Review of the knowledge of microbial contamination of the Russian manned spacecraft [J]. *Microbial Ecology*, 2004(47): 127-132.
- [56] O' BRIEN B. Direct active measurements of movements of lunar dust [J]. *Journal Article*, 2009, 36 (9) : L09201-1-L09201-5.
- [57] KAWAMOTO H. Electmstatic cleaning system for removing lunar dust adhering to space suits [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 24(4):442-444.
- [58] TARLOR L A, SCHMITT H H. The lunar dust problem: From liability to asset [R]. AIAA 2005-2510. AIAA SPACE 2005 Conference and Exposition, 2005.
- [59] GAIER J R. The effects of Lunar dust on EVA systems during the Apollo Missions [R]. NASA/TM-200-213610. 2005.
- [60] 蔡震波, 曲少杰. 火星探测器全任务期空间环境特征与防护要点[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(6): 542-548.
- CAI Zhenbo, QU Shaojie. Space environment characteristics and key points in space environmental protection design for Mars probe mission [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 542-548.
- [61] STELLA P M, HERMAN J A. The mars surface environment and solar array performance [C]. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010.
- [62] 刘志全, 杨淑利, 濮海玲. 空间太阳能电池阵的发展现状及趋势[J]. *航天器工程*, 2012, 21(6):112-118.
- LIU Zhiquan, YANG Shuli, PU Hailing. Development and trend of space solar array technology [J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, 21(6):112-118.
- [63] HOANG B, WHITE S. Commercialization of deployable space systems's roll-out solar array (ROSA) technology for Space Systems Loral (SSL) solar arrays [C]// *Proceedings of IEL Conf. Taipei, China; IEEE*, 2016.
- [64] 姜东升, 程丽丽. 空间航天器电源技术现状及未来发展趋势[J]. *电源技术*, 2020, 44(5):785-790.
- JIANG Dongsheng, CHENG Lili. Summary of present and trend for electrical power system of spacecraft [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, 44(5): 785-790.
- [65] 黄志勇, 姜胜耀, 周子鹏, 等. 反应堆生产放射性同位素热源材料及其应用[J]. *原子能科学技术*, 2009, 43(Z2): 400-403.
- HUANG Zhiyong, JIANG Shengyao, ZHOU Zipeng, et al. Production of radioisotope thermal fuel by reactor and its application [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(Z2):400-403.
- [66] 钟武焯, 赵守智, 郑剑平, 等. 空间热离子能量转换技术发展综述[J]. *深空探测学报*, 2020, 7(1):47-60.
- ZHONG wuye, ZHAO Shouzhi, ZHENG Jianping, et al. A Review of technology development of thermionic energy conversion for space application [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1):47-60.
- [67] 张颖一, 张伟, 王功. 太空增材制造的技术需求和应用模式探索[J]. *中国材料进展*, 2017, 36(7):503-511.
- ZHANG Yingyi, ZHANG Wei, WANG Gong. Discussion on the technical demands and application modes of additive manufacturing in space [J]. *Materials China*, 2017, 36 (7) : 503-511.
- [68] 许婧, 邢悦, 郝思嘉, 等. 石墨烯/聚合物基复合材料3D打印成型研究进展[J]. *材料工程*, 2018, 46(7): 1-11.
- XU Jing, XING Yue, HAO Sijia, et al. Research progress in graphene/polymer composites processing using 3D printing technology [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(7) : 1-11.
- [69] 刘雨, 陈张伟. 陶瓷光固化3D打印技术研究进展[J]. *材料工程*, 2020, 48(9): 1-12.
- LIU Yu, CHEN Zhangwei. Research progress in photopolymerization-based 3D printing technology of ceramics [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(9): 1-12.
- [70] 郜庆伟, 赵健, 舒凤远, 等. 铝合金增材制造技术研究进展[J]. *材料工程*, 2019, 47(11): 32-42.
- GAO Qingwei, ZHAO Jian, SHU Fengyuan, et al. Research progress in aluminum alloy additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(11): 32-42.
- [71] DAVID S. Industry Test Additively Manufactured Rocket Engine Injector [A/OL]. NASA, 2013. <http://www.nasa.gov/press/2013/july/nasa-industry-test-additively-manufactured-rocket-engine-injector-0/>
- [72] MOMENI F, MEHDI S M, HASSANI. N, et al. A review of 4D printing [J]. *Materials and Design*, 2017, 122: 42-79.
- [73] 沈自才, 夏彦, 丁义刚, 等. 4D打印及其关键技术[J]. *材料工程*, 2019, 47(11): 11-18.
- SHEN Zicai, XIA Yan, DING Yigang, et al. 4D printing and its key technologies [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(11): 11-18.