

我国未来探月工程任务对材料需求展望

高 鸿¹ 沈自才² 何端鹏¹ 刘国强³

(1 中国空间技术研究院,北京 100094)

(2 北京卫星环境工程研究所,北京 100094)

(3 北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

文 摘 月球是深空探测的热点,也是美、欧等国家航天技术的竞技场。随着我国“绕、落、回”探月工程的成功实施,建设月球基地和月球空间站已成为新任务的论证热点,这将对材料提出新的需求和发展方向。本文在概述月球环境对航天材料的影响的基础上,分析我国未来探月工程的任务难点,并从轻量化结构、高效热管理、先进热防护、低温润滑、防尘、缓冲吸能等不同角度提出了探月工程对航天材料的新需求,最后给出了后续如何发展探月工程新材料新技术的建议。

关键词 探月工程,空间环境,难点分析,材料需求,发展建议

中图分类号:TJ86

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.05.002

Prospect of Material Demand for Future Lunar Exploration Project in China

GAO Hong¹ SHEN Zicai² HE Duanpeng¹ LIU Guoqiang³

(1 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

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

(3 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

Abstract The moon is not only a hot spot in deep space exploration, but also an arena for aerospace technology in the United States, Europe and other countries. With the successful implementation of China's "orbit, fall and return" lunar exploration project, the construction of lunar base and lunar space station has become the focus of demonstration of new tasks, which will put forward new requirements and development direction for materials. Based on an overview of the impact of the lunar environment on aerospace materials, the tasks and difficulties of China's future lunar exploration projects are analyzed, and the new requirements of lunar exploration projects for aerospace materials such as lightweight structure, efficient thermal management, advanced thermal protection, low-temperature lubrication, dust prevention, cushioning and energy absorption are put forward. Finally, some suggestions on how to develop new materials and technologies for the lunar exploration project are proposed.

Key words Lunar exploration projects, Space environment, Difficulty analysis, Materials requirements, Development advice

0 引言

月球探测代表了一个国家的科技水平和综合实力。月球上特有的矿产和能源,是对地球资源的重要补充和储备,我国开展月球探测,参与月球的能源与资源的开发利用活动可为人类社会的可持续发展做出重大的贡献^[1]。2004年至2020年,中国探月工程的目标是通过轨道航天器的探索,实现对月球的全面了解;进一步开展月球表面探测、测绘,着陆器、月球车软着陆等;最后通过采集月球岩石和土壤样本,并将其返回地球,对

月球获得更深入的了解。2020年,“嫦娥五号”任务作为我国探月工程中“绕、落、回”三步走的收官之战,将我国带入月球探测技术国际先进行列^[2]。后续的探月工程将充分利用探月三期已取得成果,进一步开展月球科研站建设,将突破月面高精度自主着陆、大范围移动勘察、长期能源供给、高速数据通信、多功能智能机器人、多平台协同工作等关键技术,并具备月面长期且连续工作能力,如图1所示。最终实现月球科学研究、月球探测技术和月球资源应用能力的国际领先,成为

收稿日期:2021-06-19

第一作者简介:高鸿,1980年出生,研究员,主要从事航天器用材料的规划、测试技术、质量及可靠性研究工作。E-mail: gaohong_cast@sina.com

“2030年跻身创新型国家前列”和航天强国建设的重要标志。

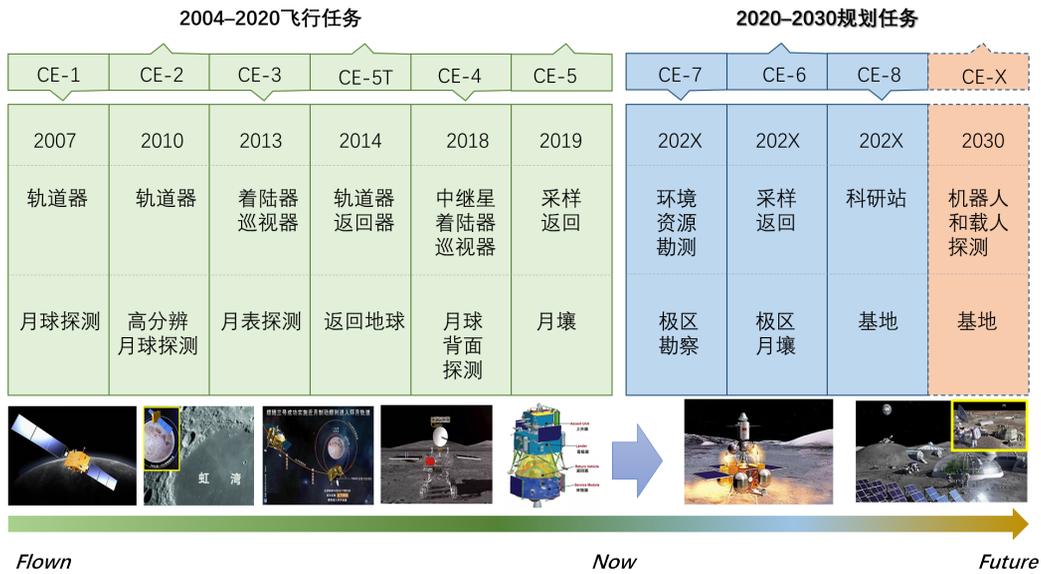


图1 中国探月工程发展战略

Fig. 1 Development strategy of China's lunar exploration program

我国未来探月工程任务具有挑战性、探索性、复杂性和创新性,材料技术作为探月任务基础支撑,也将面临更大的挑战。本文将在分析月球表面自然环境对材料的影响的基础上,概述月球探测任务的难点,并进一步提出我国未来探月工程对新材料的需求。

1 月球表面自然环境对材料的影响

月球表面自然环境涵盖银河宇宙射线、太阳风(热电子)、太阳紫外线、光电子、地球磁层等离子体粒子、月尘(带电尘埃粒子)、真空、高低温等,如图2所示,这些空间环境因素均可能会对材料性能带来影响。

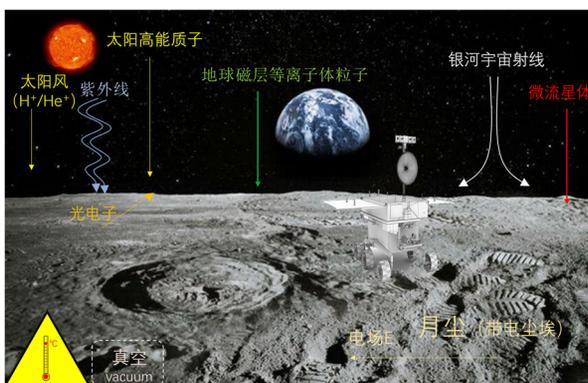


图2 月球表面自然环境要素示意图

Fig. 2 Diagram of natural environment elements on lunar surface

1.1 月球表面辐射环境对材料累积失效

月球基地、月球空间站等空间基础设施长期在轨运行期间,以太阳宇宙线、银河宇宙射线、太阳风、太阳电磁辐射以及月面中子等空间辐射环境将对月球空间基础设施材料带来严重威胁。月球表面的每

日银河宇宙射线(GCR)剂量当量大约比国际空间站内的剂量高2.6倍^[3]。太阳宇宙射线粒子可以在日冕或行星际空间中被加速,并在不到一天的时间内到达地月空间。在太阳活动峰年期间,来自于太阳耀斑和日冕物质抛射的高能量、高通量带电粒子流将对月球空间基础设施中的电子材料、光学材料以及光电材料带来严重的电离和位移,引起电离总剂量效应、位移损伤效应及单粒子效应,导致关键光学器件、光电器件及电子学器件的在轨故障甚至失效。

而来自于空间的高能紫外光子,在月球的极高真空和极端温度的协同作用下,将对月球基础设施的有机材料和无机材料均带来严重威胁。对于金属材料,紫外辐射带来的光电效应,在金属表面产生自由电子,使其表面带电,且电位逐步升高,将干扰航天器的电磁系统。而对于光学玻璃、太阳能电池盖板等材料,紫外射线可改变光学材料颜色,影响光谱的透过率。紫外线照射可引起有机分子化学键的断裂。当发生有机分子的光化学反应或自由基反应时,形成挥发性化合物或者产生不饱和键,可能导致材料变色变性、分子分解等效应,造成光学性能和机械性能的退化。

另一方面,月球表面晨昏交界位置,由于太阳紫外光子的作用,将引起月尘的带电而漂浮,这些尘埃带电粒子以及来自于太阳风的低能粒子可以引起月球探测器的表面充电,进而可诱发放电效应。

相较于地球轨道和地面环境,中子环境是月球表面的特殊环境,其对关键光电材料、有机材料、电子材料均带来严重威胁,可造成光学玻璃类材料颜

色变暗、有机材料快速老化、电子材料及其器件的单粒子效应等。因此,月球探测材料的中子损伤效应及中子防护材料是需要重点关注的方向。

1.2 月尘环境造成航天材料表面吸附效应

NASA 为了研究月球尘埃对舱外活动系统(主要是阿波罗表面航天服)的影响,研究了六次登陆月球表面的阿波罗任务记录(阿波罗 11~12 号、14~17 号)。人类所有舱外活动经验基本上来自于这六次

阿波罗着陆任务。事实证明,月球表面的尘埃问题比任何人预想的都要严重。比如 Apollo 17 号航天服执行月球行走任务期间,航天服的各个位置均遭受到了月尘的严重污染和擦伤^[4-5],如图 3 所示。月球尘埃在航天员着陆后会模糊他们的视线,刺激他们的眼睛和肺部,还会堵塞机械装置,划伤仪器外壳,降低散热器的性能,损害密封性。



图3 Apollo 17号航天服各个部位的月尘污染情况^[4]

Fig. 3 Views of Apollo 17 spacesuit contaminated by lunar dust

月尘颗粒会附着在与其接触的各类表面上,包括热控面、辐射器、太阳能电池板、结构机构表面等,主要造成九类危害:视力模糊、仪器读数错误、形成灰尘层和污染、牵引力丧失、机械堵塞、磨损、热控制问题、密封失效、吸入和刺激。月尘对于金属表面(例如铝)的附着力一般为 200~300 Pa,而对于涂层表面更高,则一般在 1 kPa 左右^[6]。附着于辐射器表面的月尘可能导致热控系统的热物性能指标变化,引起热控故障;虽然尘埃的红外发射率(~ 0.88)与热控制面(~ 0.83)相似,热控面发射率不会受到灰尘的很大影响。但附着的尘埃也将提高辐射器表面对于宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第5期

可见光和紫外线的吸收能力,尘埃覆盖率为 11% 时,可导致吸收率增加 100%^[7-8],因此辐射器性能的下降主要是由于紫外线和可见光区域的吸收增加,导致温控系统故障。在阿波罗 12 号任务中,由于热控制表面附着上月尘,磁力计在 5 个不同位置测量到的温度比预期高了大约 20 °C。对于舱外太阳翼表面,带电月尘的漏电效应和放电效应引起太阳能电池阵电路损伤。此外,月尘或月壤沉积在机械结构内部或表面将造成机构卡死、密封机构失效、部件磨损等故障。光学镜头也是最容易受到月尘影响的部件。

1.3 微流星撞击影响材料结构和性能

月球表面平均每年累计流星模型计算显示,来自于太阳方向的小流星体($<1\ \mu\text{m}$)通量明显增加,而从地球运动方向到达月表的大粒子流星体($>1\ \mu\text{m}$)稍有增加^[9]。月面朝向地球公转运动方向时,将遇到更大更多的流星体;同时,有数据表明,在月球表面的流星体通量可能比在月球轨道上高得多。质量为 $1\ \mu\text{g}$ 的小流星体可以在金属表面形成直径为 $500\ \mu\text{m}$ 的撞击坑,对于大多数材料来说,撞击坑深度与直径相当,脆性材料可能会扩大到更大的深度^[10]。虽然概率低,但大流星体的撞击危险更大。对于质量约为 $1\ \text{g}$ 的流星体,就会形成厘米级的陨石坑。微流星将带来航天器复合材料构成损坏,对压力容器造成损害进而影响航天器姿态控制能力,对天线系统则为造成天线变形及性能下降;撞击坑可能对太阳能阵列结构没有明显的影响,但可能损坏传感器,同时带来光学盖片的透光性能下降并影响到电池性能。总之,对于一个大型但非载人的结构来说,微流星体造成的后果可能非常小。然而对于一个虽小但至关重要的生命维持系统来说,后果可能非常巨大。因此,在开展月球基地设计和建设时,必须周全考虑流星体的危害。

1.4 高真空对材料带来复杂的影响

在月球夜晚,气体浓度仅为 2×10^5 分子/ cm^3 ,而在白天,可能下降到 10^4 分子/ cm^3 ,这比地球的大气层少了大约14个数量级,所以月球拥有一个接近真空的环境,容易引起航天器及其载荷的压力差效应和真空放电效应。此外,受真空影响,非金属表面吸附的或溶解于内部的小分子会以气体形式不断从材料表面释放出来。材料在高温真空环境下存在蒸发升华效应和分解效应,会改变材料原有性能,如热物理性能、光学性能和介电性能等。此外,由于月球的高真空状态,月球车和月球车内仪器各部件的传动润滑油极易挥发而失效。当航天器表面材料失去氧化膜时,可能发生冷焊效应,这对于航天器的活动部件可能造成致命伤害。

1.5 月球表面极端温度环境给材料带来热失效

月表温度受太阳直射、自身反射和辐射的影响。月表受到太阳照射时,可达 $150\ ^\circ\text{C}$ 的高温。由于全年与太阳的距离在变化,月亮温度也在变化。正午温度从远日点到近日点上升约 $6\ ^\circ\text{C}$ 。月表在未受阳光照射时,温度急剧下降,一般处于 $-130\sim -160\ ^\circ\text{C}$,且月夜的极限低温可能低至 $-180\ ^\circ\text{C}$,极地陨石坑温度低至 $-220\ ^\circ\text{C}$ 。月球从黎明到正午,月表温度上升约 $280\ ^\circ\text{C}$,从而对材料造成剧烈的冷热冲击。暴露于月球表面材料,受高低温环境影响,材料将会热疲劳开裂、高温老化、低温脆化。为能保证探月任务顺利实

施,月球探测器和巡视器的设计可采用温控装置来保证设备正常工作。

2 探月工程任务难点分析

2.1 开展结构的轻量化设计,满足深空探测的高承载要求

随着月球探测任务的推进,未来将开展月球基地及月球空间站的建设,这会产生在轨结构尺寸大、质量高等问题。而大尺寸和高质量就要求具有更高的运载发射和在轨组装能力。未来,提高发射效率、实现高载荷比的发射是月球探测任务的难点之一。

采用轻量化结构,尤其是采用柔性展开式结构材料和轻质高强复合材料可在实现既定结构功能的同时,也满足大尺寸和轻质量的目标,解决高发射重量和有限运载能力之间的矛盾。

2.2 克服低太阳能源供给限制,提高能源供给能力

未来的月球空间基础设施将需要大量的能源供应,传统的太阳电池阵的能源供给方式设计需要更大尺寸的太阳电池阵来满足在轨能源供给需求,同时,长期在轨任务期间的太阳电池发电效率的下降也带来了空间电源的供电能力的不可维持性。因此,如何克服传统太阳电池阵的能源供给限制是未来月球探测任务的重点和难点方向之一。

除了利用三结及多结砷化镓太阳电池之外,需开发发电效率更高的太阳电池或者研制高功率质量比的太阳电池,如柔性薄膜太阳电池。也可以利用小型核能发电来实现月球任务能源的持续供给,克服传统太阳电池受太阳光照和空间环境的影响,以满足工程任务对能源供给需求。

2.3 克服月球极端温度环境,实现长期在轨服役

面临深空低冷环境、高低温宽温域服役环境等极端环境条件,需要掌握各类材料在无热控管理周期内, $-200\ ^\circ\text{C}$ 以下的性能数据,构建可用于深空探测任务的材料数据资源,为设计师提供更为科学的仿真技术依据,规避冗余热设计、结构强度刚度设计,保障探测器的长寿命服役需求。

2.4 针对中子等复杂辐射环境威胁,加强辐射损伤分析预示及辐射防护分析

与地球轨道不同,由于没有地磁场的捕获,月表的空间辐射环境相较于地球轨道要小的多,但针对长期在轨月球探测任务以及月球特有的中子辐射环境,如何开展长期月球任务的辐射环境效应分析预示以及针对月球辐射环境的辐射损伤的防护和减缓是未来月球任务的难点之一。通过加强辐射损伤分析预示及辐射防护分析,选用具有高能粒子和中子综合防护材料体系,提高探测器在轨服役安全性。

2.5 提高材料耐磨性和防护能力,减缓月尘带来的

摩擦磨损及结构卡死

未来的月球任务包括月面行走,航天员所穿戴的航天服以及头盔光学系统将面临月球表面尘埃的摩擦磨损,甚至是穿透等威胁,造成航天员头盔的透光性能降低、航天服的穿孔风险增大等。尤其是月面行走任务,月尘进入结构机构系统中,有可能造成结构机构的摩擦磨损和机构卡死。因此,在未来的月球任务中,针对月尘的威胁,如何研制抗摩擦磨损的润滑涂层类材料,保障长期月球任务的可靠性是需要克服的难点。

3 探月工程对新材料发展需求

3.1 轻量化结构材料

轻量化结构始终是探月工程任务发展的主要需求。航天器结构不仅提供载荷承载功能,还发挥绝缘、固定、封装、隔热等作用,同时为单机设备搭建布局空间。探月工程任务减重需求更为迫切,结构设计将采用桁架式结构、半刚性结构、柔性展开结构、充气式结构等轻量化结构。新型高比强铝锂合金、铝镁合金、铝基碳化硅复合材料、高性能钛合金、高性能镁基合金以及碳纤维、碳纳米管等复合材料的选用,是刚性结构减重的主要解决途径^[11];高强高模聚酰亚胺纤维、高强度氧化铝纤维、芳纶纤维及其编制织物、多层复合薄膜、柔性泡沫等高性能非金属材料将是柔性或半刚性结构的主要组成。此外,针对相机保持架、天线结构等有高尺寸精度、高稳定度要求的功能载荷结构产品,需满足在轨极端低温和宽温域环境下高尺寸稳定性、多层界面良好的界面相容性、多相材料间稳定应力等要求。

3.2 高效热管理材料

月球表面日间高温可达150℃,晚间低温在-130~-160℃,极限温度可达-180~-210℃,月坑内长期处于-200~-240℃。为保证探测仪器的正常工作,月球表面用于科研任务探测器、着陆器和飞跃器需要更高效、更智能、更敏捷的热管理系统,以保证舱内仪器设备正常工作。热管理材料体系中,绝热材料可采用纳米气凝胶等轻量化结构隔热一体材料;辐射防护隔热材料可采用可调发射率智能隔热材料、轻量化多层隔热材料;导热材料可使用轻量化石墨高导热薄膜类材料、金刚石复合材料;蓄热材料可选用石蜡、酯酸、结晶水合盐、熔融盐、金属合金等材料;表面改性材料可采用有机涂层、无机涂层等材料;界面填充材料可选用导热硅脂、导热硅橡胶、硅橡胶导热垫、铝箔等材料。

气凝胶是已知最轻的固体之一,在真空中表现出优异的隔热性能。纳米气凝胶材料未来的发展重点主要在于保证优异的机械和隔热性能,具备优良的工艺制造性,不断拓宽其耐温上限。纳米气凝胶材料研制的基础研究中,成分调控、结构优化、异质

设计等成为了有效手段。NASA火星任务中已应用SiO₂气凝胶来隔离最敏感的电子元件^[12]。此外,一体化热防护系统(SITPS)中也采用气凝胶隔热复合材料作为隔热夹芯层,结合防热、隔热与承载多功能一体化、梯度化热防护设计理念,开发气凝胶复合材料工艺是未来气凝胶复合材料重要研究方向。

在各种开发和应用中的新热控制技术中,具有重大创新性的是可变发射率智能热控涂层。智能热控涂层可以根据环境改变他们的有效发射率,可有效节省补热功率,大大降低热控系统质量。这个技术特别适用于功率和质量分配非常有限的航天器,是有效解决有限质量、功率与温度调控能力之间矛盾的重要手段。轻量化多层隔热材料可设计由多达几十层的热控材料组成,以获得所需的光学和绝热性能。通过反射金属化层,最小化辐射传热,通过使用低热导材料分隔金属化层,限制传热。多层隔热材料的有效发射率通常在0.015~0.030。

导热材料在探测器电子电路板、电池组件、散热器中都有应用。研究集中在开发低密度,具有高导热系数,又具有良好的强度刚度保持,还具有低热膨胀系数的高导热材料。石墨纤维复合材料已被开发制造出来,以提供高的热导率同时保持良好的机械性能。热解石墨膜嵌入到基体材料中的应用也受到了关注。化学气相沉积(CVD)金刚石薄膜是已知的最坚硬的材料,其热导率达到1.1 kW/(m·K)。碳纳米管,作为高导热材料应用潜力巨大。碳纳米管的理论热导率为6 kW/(m·K),抗拉强度为63 GPa,然而,碳纳米管被发现才20年,应用于航天器之前还需要进一步的研究。泡沫碳也显示了高热导率,密度仅为0.5 g/cm³左右,在散热器中显示出应用的潜力。

3.3 先进热防护材料

在地球轨道再入或行星进入过程中,采用防热结构,可以借助大气层这一天然资源,使航天器减速、下降,并耗散它所具有的巨大能量。探月返回的航天器以第二宇宙速度再入地球大气层时,面临峰值热流密度大、焓值高、压力低和再入时间长等热环境特征,需承受很高的气动热和过载,其中烧蚀防热材料是航天器近地返回技术的核心。该类材料一般具有低密度、耐高温、低热导率、低烧蚀量和高热阻效应的特点,通过相变和物质消耗起到防热作用,可用于高焓高热流环境。未来深空探测工程再入返回任务对烧蚀防热材料提出高效轻质要求,需要采用多种防热材料及其组合结构设计,攻克制备工艺技术,如图4所示。多用途飞船的多次往返要求防护材料由一次使用向多次复用发展。通过三维编织、功能梯度材料、点阵复合材料、有机-无机杂化等技术

应用,可有效解决防热结构和材料的烧蚀层稳定性、内部热解气体释放、不同密度和材料层之间连接可靠性以及热性能匹配等关键问题^[13]。同时,保证烧蚀材料的整体密度得以持续下降,且使用极限环境

条件(热流密度、驻点压力、气动剪切等)持续升高,甚至从短时高温向长时高温且有氧等方向发展,逐步形成多种功能化涂层—表层耐烧蚀材料—内部低密度隔热材料的烧蚀/隔热/结构一体化防热体系。

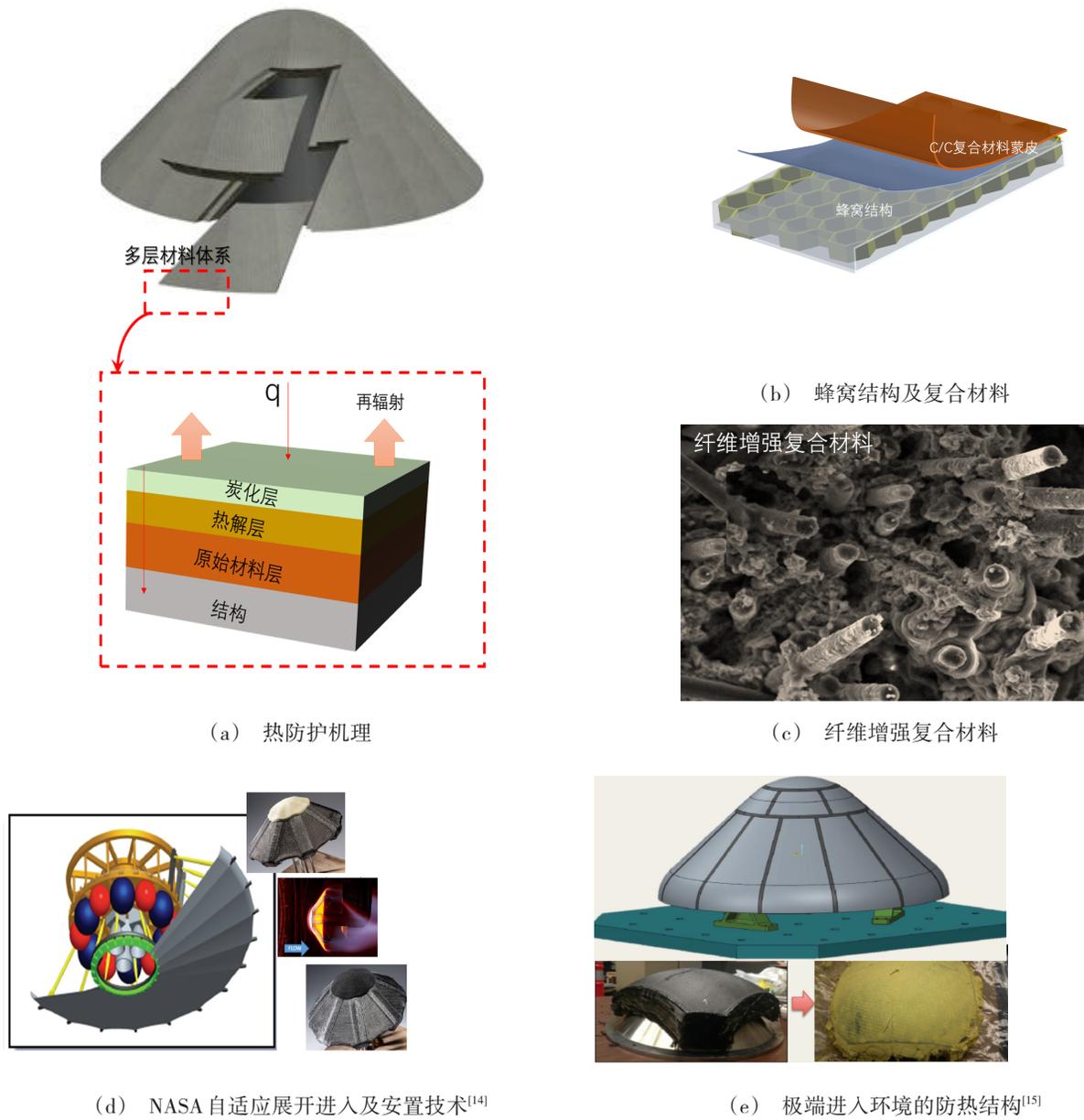


图4 热防护材料体系
Fig. 4 Thermal protection material system

另一方面,充气式减速器作为再入、返回、减速、着陆的另一个轻量化结构的代表,其所用的防热材料及其构件也需要兼具低密度、耐高温、低热导率、低烧蚀量和高热阻塞作用等综合性能。充气式减速器起到再入防热、气动减速及缓冲着陆的主要作用,同时在着陆过程中通过充气结构实现着陆器的着陆缓冲从而安全到达地面完成回收。充气式再入减速器热防护复合材料是实现这一功能的关键。一般,材料设计包含防热层、隔热层、阻隔层三部分。防热

层成分为热稳定性优异的特种陶瓷纤维,隔热层主成分为气凝胶,阻隔层主成分为聚酰亚胺薄膜或凯芙拉纤维,比如,NASA发射的IRVE-3采用Nextel440BF-20作为外层防护,隔热层为Pyrogel3350,气密层为Kapton/Kevlar/Kapton^[16-18]如图5所示。由于可折叠展开柔性热防护系统(TPS)的厚度较薄(~10 mm),这就对耐热和隔热性能提出了苛刻的要求。NASA提出了Nomex-Viton结合的热防护复合材料以及超薄的新陶瓷涂层,可承受极

高温环境。IRVE 防热系统就成功使用了单面或双

面涂覆的对位芳纶、聚酯纤维以及 ILC 纤维^[19]。

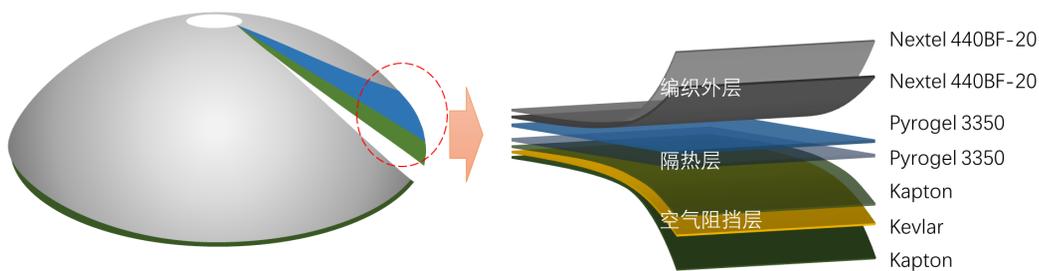


图5 IRVE-3中TPS的层合结构^[18]
Fig. 5 Laminated structure of TPS in IRVE-3

3.4 低温润滑材料

航天器的运动机构常用润滑材料来达到减摩抗磨、延长使用寿命的目的。例如大型天线转动机构、太阳能电池阵的驱动机构、展开和收缩机构、高功率电刷-滑环和大直径轴承,以及空间站的电接插件、流体连接器和密封件等工作过程中发生多次结合与脱开的机构等均需可靠的润滑并防止真空冷焊、摩擦磨损。航天器常用润滑材料主要有液体润滑剂、固体润滑材料以及固-液混合润滑材料^[20]。其中,固体润滑材料是一类新兴的润滑材料,具有良好的耐摩擦和抗磨损性能。相比于液体润滑剂,固体润滑材料在真空环境中蒸发率低,可以解决润滑油和润滑脂的真空挥发问题,常用于高温、高载荷、超低温、高真空、辐射、腐蚀介质等苛刻环境下工作的微动摩擦、无供油储油空间等特殊零部件。空间环境通常要求固体润滑材料具有良好的物理热稳定性、化学热稳定性、时效稳定性、不产生腐蚀和其他有害作用、与底材具有较强化学亲和力等。固体润滑材料分为固体润滑粉末、固体润滑薄膜/涂层和自润滑复合整体材料三种类型,主要包括溅射二硫化钼薄膜、溅射类金刚石薄膜、粘结二硫化钼膜、粘结聚四氟乙烯膜以及聚四氟乙烯和聚酰亚胺自润滑材料等。在未来探月工程任务中,面对极端低温、真空、微重力环境,尤其是月尘环境,研制既有耐月球极端环境,又能耐月尘的低摩擦损耗固体润滑涂层类材料,如TiS涂层等固体润滑材料具有迫切的需求。

3.5 防尘/自清洁材料

防尘/自清洁材料可用于月球表面工作时太阳翼等设备表面的清洁,避免因尘埃污染而使发电效率等工作性能下降。月球尘埃环境是导致月球探测器各功能器件可靠性差、功能退化和寿命不足的关键因素。目前,以NASA为主导的国际各空间研究机构已经发展和提出了各种防/除尘技术,包括以电帘技术为代表的主动防/除尘技术和以薄膜技术为代表的被动防/除尘技术^[21-23]。其中薄膜防/除尘技术是通

过月尘静电力和与外露表面粘着力的最小化,从而最大程度地减小月尘在器件表面的粘附。表面微结构对于表面的浸润性有重要影响,超疏水表面及其自清洁功能在涂料、纺织、生物医用领域的应用,表面的微结构不仅减少了固液接触面积、水滴在表面容易滚动,而且也使得表面与污染物的接触面积减少,相互作用力减弱,从而使得水滴滚动时易于带走表面的污染物。以此为基本原理,制备地外天体表面防月尘和易清除月尘表面材料以及研究相关防尘技术具有重要的应用价值。

3.6 缓冲吸能材料

对于未来载人深空探测而言,缓冲吸能材料尤为重要,主要用于探测器返回地面或在其他星球表面着陆时,缓冲探测器受到的冲击,吸收相应的冲击能量,保证探测器和人员的安全着陆。我国在探月三期工程中,月球着陆器使用的缓冲吸能材料是一种高锰奥氏体不锈钢材料,该材料兼具一定的拉伸强度,超高塑性,比一般金属合金具备更高的断裂延伸率(50%~70%),具备承载能力的同时也具有塑性吸能的功能。该材料作为月球着陆拉杆和限力拉杆使用,通过拉杆在着陆过程中塑性变形,吸收着陆冲击动能,从而起到缓冲和减震作用。随着未来月球基地建设等探月任务的开展,着陆器质量将大幅提升,着陆载荷增大,需要通过结构优化和材料性能优化发展更好超速性着陆吸能材料。

3.7 辐射防护材料

质量屏蔽方法是高能带电粒子防护所采用的基本方法,但屏蔽材料厚度的增加将带来航天器质量的增加和次级辐射,尤其是中子。为此,可以通过采用含氢元素多的材料来与中子作用,使中子能量降低并沉积下来。如图6所示,随着材料中氢元素含量的增加,其单位质量的材料吸收剂量增加^[24-25]。因此,可以通过利用高原子序数的材料和低原子序数的材料制成复合材料,使其既能屏蔽高能带电粒子,也能屏蔽中子,从而起到组合屏蔽的作用。

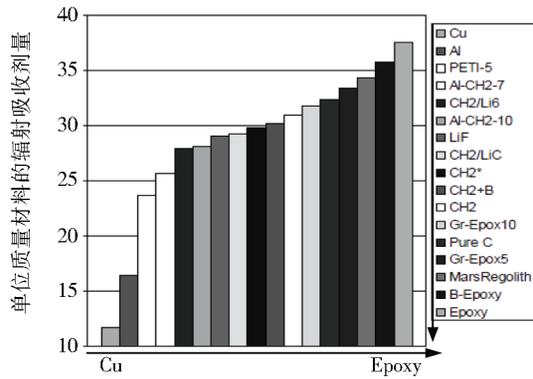


图6 单位质量的不同材料对辐射剂量的吸收^[23-24]

Fig. 6 Absorbed dose of different materials in radiation environments

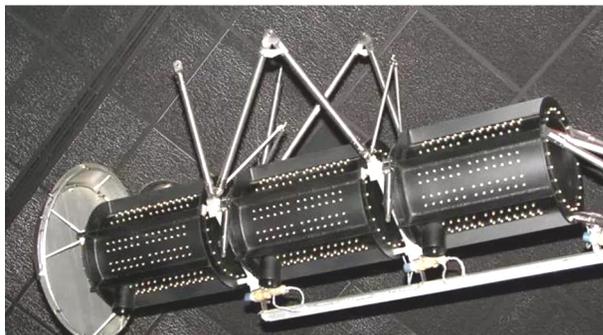
3.8 其他功能材料需求

3.8.1 热电材料

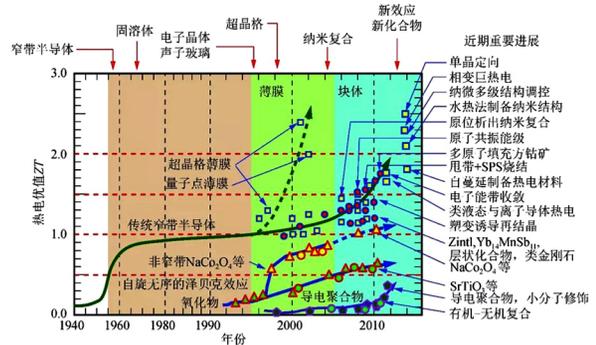
随着深空探测任务距离太阳越来越远,太阳辐射强度会越来越弱,探测器所能利用的太阳能也就越来越少,为了能够获得足够的能源支撑探月任务的正常进行,就需要探测器具有较强的供电能力。在这些情况下,太阳能电池和化学燃料电池都无法满足任务要求,而放射性同位素温差电源(Radioisotope Thermoelectric Generator-RTG)由于其高可靠性、安全性和长寿命,是深空探测的首选电源系统^[26]。放射性同位素温差电源是基于塞贝克效应的电源技术,美国和俄罗斯是目前世界上拥有最先

进温差电技术的国家。我国也在“嫦娥三号”月球探测器上首次使用了自主研发的核电源,成为世界上第三个将放射性同位素温差电源技术应用于太空探测的国家。

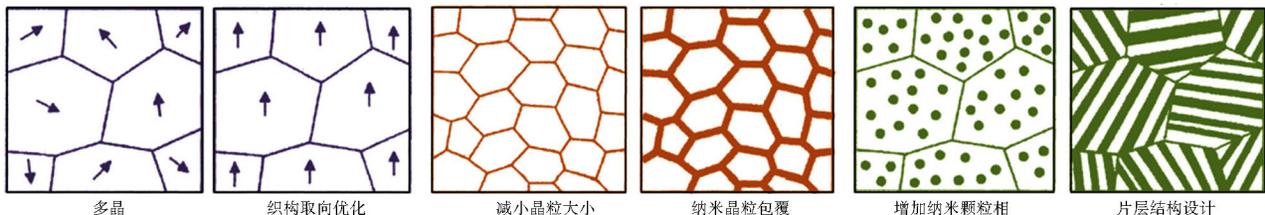
热电材料是一种能将热能和电能相互转换的功能材料,在核电源中有着广泛的应用前景,如图7所示。热电转换效率是衡量热电材料性能的关键指标,它主要取决于材料的性能平均ZT优值;从定义 $ZT=(S^2\sigma/\kappa)T$ 可见,在一定的温度 T 下,高效热电材料应具有大的温差电动势 S (产生大的电压),优异的电导率 σ (产生小的焦耳损耗)和低的热导率 κ (产生大的温差)^[27]。但由于这几个热电参数之间存在复杂的互动关系,比如,Wiedemann-Franz关系使得提高导电性的同时也带来导热性的提高,Pisarenko关系使得在增大温差电动势的同时也限制了导电性能。因此,要实现高热电优值是一个巨大的技术挑战。通过协同调控电传输和热传输的关系来实现ZT值净增长(net ZT)的方法层出不穷,如:引入点缺陷、位错、纳米沉积、基体纳米化、能带结构调控、电-声-磁协同调控、调整晶体结构对称性、界面(晶体结构、能带结构和显微结构)控制、有机-无机复合、相转变、高熵、多尺度化学键设计和寻找具有复杂晶胞、非谐振效应、类液态声子传输、孤对电子等特点的低热传导材料等。



(a) 旅行者号用的“核能电池”



(b) 热电材料发展趋势^[28]



(c) 热电材料晶粒及界面调控机制

图7 热电材料在核电池中的应用及发展

Fig. 7 Application in nuclear cells and development of thermoelectric materials

3.8.2 新型低维材料

新型低维材料^[29-31]具有独特的几何结构、新奇

的光电特性,有望在纳米器件中获得广泛应用,尤其是其在光电子领域巨大应用潜力,使得实现高质量、

特定结构、电子态可控的低维纳米线成为国际的热点。

可以通过电场、光场、磁场、温度场对新型低维材料进行调控,以提高材料性能,提升器件探测能力。面向未来探月工程对探测技术、天文观测技术等综合需求,基于该类材料设计出更多新型的红外探测器,比现有的传统探测器“看得更清、看得更远”。

3.8.3 零膨胀功能材料

在月球探测任务中,特别是对于光学类的有效载荷而言,由于太空环境温度会经历巨大的变化,要求采用热膨胀系数接近于零的功能材料来制造尺寸稳定的产品。零膨胀材料^[32-35]对于卫星定位与导航、高精度设备、计量和精密仪器的构件等都非常重要。因此,零膨胀功能材料在深空探测领域具有十分重要的应用价值。

例如探月任务中,极紫外相机的光学设计采用的是单球面反射镜,并且极紫外相机的工作温度范围变化很大,所以在进行反射镜光学材料的选择时,要求兼顾轻量化和零膨胀系数。根据材料性能和目前国内外极紫外相机材料的使用经验,决定采用零膨胀系数的微晶玻璃作为反射镜的加工材料。

4 后续发展建议

未来,我国探月工程将面临大能源需求和低太阳能供给矛盾,复杂任务和高可靠性设计矛盾,深空极低温服役和在轨长寿命矛盾,大载荷比和轻量化结构矛盾,为满足后续探测任务需求,这些矛盾均需依靠新材料技术的创新发展。月球环境具有超低温、强辐射、高真空、微重力等特征,以及大量尘埃,这些环境特征均对探月任务前沿新材料的性能和功能提出更高要求。为保证我国未来探月工程任务高质量实施,需要借从国家层面集智攻关,实现关键技术突破。

4.1 大力发展宽温域服役轻量化柔性结构及材料

柔性结构是将非金属复合材料、气凝胶、泡沫、有机纤维、薄膜等通过柔性胶黏剂、针织拼接、热封接等工艺技术综合应用,实现结构热控一体化设计,具备发射阶段高收拢比、在轨大尺寸展开的优势。大力发展我国柔性特种纺织品、胶黏剂、泡沫、纤维及其编织、拼接工艺用胶粘剂、热封类材料研制,实现材料耐高温(200~300℃)、耐低温(-200℃)以及宽温域环境,长寿命服役能力。

4.2 加快智能材料在轨应用研究,提升深空探测能源利用效率

为逐步提升深空探测器能源利用高效集约能力,实现我国深空探测技术不断跨越,能耗供给合理

分配,高效应用,需要通过发展智能材料,实现在轨能源存储与复用,促进深空探测结构热控与深空环境自主适应,友好发展。需加快智能传感材料、相变材料、高功效电子及热管理材料的研发与在轨应用,为深空探测器智能化发展储备新材料技术。

4.3 发展极低温环境材料及结构性能低成本测试技术

极低温环境模拟试验需要液氮制冷实现地面模拟深空温度场环境,现有的测试技术仅能满足型号产品低温贮存试验需求。为提升产品可靠性设计,需要大量提取极低温工况下材料及结构产品热物理性能、机械性能、功能特性等基础数据。但受测试系统低温制冷速率及成本、实时原位测试系统无法低温在位加载等技术限制,我国极低温环境测试能力与月球探测任务发展需求不匹配。需通过整合光传感技术、高通量测试技术、低成本液氮循环冷技术等各种跨领域技术综合应用,构建我国极低温环境材料及结构热、力、电等测试评价能力,为深空探测可靠性设计提供必备的数据资源。

5 结束语

我国已经取得了月球探测“绕、落、回”的伟大成就,未来还将进一步开展月球空间站和月球基地的建设。针对未来月球探测的长寿命、高可靠的需求,需要在对月球环境及效应进一步梳理的基础上,针对轻量化设计、持续的能源供给、极端的温度环境、复杂的辐射环境以及月尘等带来的任务难点,从轻量化结构材料、高效热管理材料、先进热防护材料、低温润滑材料、防尘材料、缓冲吸能材料、辐射防护材料等不同角度开展探月工程用航天新材料的开发,并充分发挥我国的举国体制优势,发扬“追逐梦想、勇于探索、协同攻坚、合作共赢”的探月精神,实现我国探月工程再上新台阶。

参考文献

- [1] 欧阳自远,李春来,邹廖廖,等. 深空探测进展与开展我国深空探测的思考[J]. 国际太空, 2003(2):2-6.
- [2] OUYANG Ziyuan, LI Chunlai, ZOU Yongliao, et al. Progress of deep space exploration and thinking of developing deep space exploration in China [J]. Space International, 2003(2):2-6.
- [3] LI C, WANG C, WEI Y, et al. China's present and future lunar exploration program [J]. Science, 2019, 365(6450): 238-239.
- [4] ZHANG S, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, YU J, et al. First measurements of the radiation dose on the lunar surface[J]. Science Advances, 2020, 6(39): eaaz1334.
- [4] TAYLOR L A, TAYLOR D H. Living with astronomy on the Moon: Mitigation of the effects of lunar crust [C]. Proc.

Int'l. Aeronautical Congress, Daejeon, Korea, CD-ROM, IAC-09 A. 2009.

[5] 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 Z C, DAI W, BAI Y, 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.

[6] VONDRAK T J, FARRELL R R, FARRELL W M. Impact of lunar dust on the exploration initiative[C]. 36th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute. 2005, 2277.

[7] TATOM F B, VANJA Srepel, JOHNSON R D, et al. Lunar dust degradation effects and removal/prevention concepts [R]. NASA68-19020, 1968.

[8] STEPHEN J, RONALD E D, ROBERT S H. Lunar dust deposition on the solar absorptance of thermal control materials [R]. AIAA71-459, 1971.

[9] ECKART P. The lunar base handbook[M]. McGraw-Hill Higher Education, 1999:140-149.

[10] VANIMAN D, REEDY R, HEIKEN G, et al. The lunar environment [M]. The Lunar Sourcebook, CUP, 1991: 27-60.

[11] 李明. 我国航天器发展对材料技术需求的思考[J]. 航天器工程, 2016, 25(2): 1-5.

LI Ming. Review on requirement of materials technology for development of Chinese spacecraft[J]. Spacecraft Engineering. 2016, 25(2):1-5.

[12] HENGEVELD D W, MATHISON M M, BRAUN J E, et al. Review of modern spacecraft thermal control technologies [J]. HVAC & R Research, 2010, 16(2): 189-220.

[13] UYANNA O, NAJAFI H. Thermal protection systems for space vehicles: A review on technology development, current challenges and future prospects[J]. Acta Astronautica, 2020, 176: 341-356.

[14] CASSELL A M, WERCINSKI P F, VENKATAPATHY E, et al. Adaptive deployable entry placement technology (ADEPT) development for small sat class venus missions[C]. Venus Exploration Analysis Group 16th Meeting, November 6-8, 2018.

[15] FELDMAN J D, ELLERBY D, STACKPOOLE M, et al. Development of 3D woven ablative thermal protection systems (TPS) for NASA spacecraft[R]. NASA15-0022378, 2015.

[16] SHIDELER J L, KELLY H N, AVERY D E, et al. Multiwall TPS-An emerging concept[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 1982, 19(4): 358.

[17] WRIGHT M, COZMUTA I, LAUB B, et al. Defining ablative thermal protection system margins for planetary entry vehicles [C]. 42nd AIAA Thermophysics Conference. 2011: 3757.

[18] LICHODZIEJEWSKI D, KELLEY C, TUTT B, et al.

Design and testing of the inflatable aeroshell for the IRVE-3 flight experiment [C]. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012: 1515.

[19] LITTON D K, BOSE D M, CHEATWOOD F, et al. Inflatable re-entry vehicle experiment (IRVE-4) overview [R]. NF1676L-11478, 2011:6.

[20] 刘泊天, 张静静, 高鸿, 等. 空间用润滑材料研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(Z2): 290-292, 306.

LIU Botian, ZHANG Jingjing, GAO Hong, et al. Research Progress of lubricants for space application [J]. Materials Review, 2017, 31(Z2): 290-292, 306.

[21] CALLE C I, MCFALL J L, BUHLER C R, et al. Dust particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces with applications to NASA exploration missions [C]. Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics. ESA Minneapolis, MN, 2008: 1-14.

[22] BELDEN L, COWAN K, KLEESPIES H, et al. Design of equipment for lunar dust removal [R]. NASA-CR-190014, 1991: 19-27.

[23] IMMER C, STARNES J, MICHALENKO M, et al. Electrostatic screen for transport of Martian and lunar regolith [C]. 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference. 2006: 2265.

[24] ZEITLIN C HEILBRONN L, MILLER J, et al. Ground-based testing of radiation shielding materials [R]. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004: 781.

[25] 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.

[26] 吴伟仁, 刘旺旺, 唐玉华, 等. 深空探测几项关键技术及发展趋势[J]. 国际太空, 2013(12): 45-51.

WU Weiren, LIU Wangwang, TANG Yuhua, et al. Key technologies and development trend of deep space exploration [J]. Space International, 2013(12): 45-51.

[27] ZHAO L D, TAN G, HAO S, et al. Ultrahigh power factor and thermoelectric performance in hole-doped single-crystal SnSe[J]. Science, 2016, 351(6269): 141-144.

[28] 陈立东. 热电材料与器件[M]. 北京: 科学出版社. 2018.

[29] XIA F., MUELLER T., LIN Y. M., et al. Ultrafast graphene photodetector [M]. Nature nanotechnology, 2009, 4(12): 839-843.

[30] 王占国. 低维半导体结构材料及其器件应用研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2000, 22(1):1-8.

WANG Z G. Study on low dimensional semiconductor 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第5期

structure materials and device applications[J]. World Sci-Tech R & D, 2000, 22(1):1-8.

[31] 孙甜. 基于低维材料的宽波段光电探测器研究[D]. 苏州:苏州大学, 2018.

SUN T. Broadband Photodetectors Based on Low-dimensional Materials[D]. Suzhou:Soochow University, 2018.

[32] SLEIGHT A. Zero-expansion plan [J]. Nature, 2003, 425(6959): 674-676.

[33] ANWAR A, ALBANO M, HASSAN G, et al. Vacuum effect on spacecraft structure materials [C]. International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology. The Military Technical College, 2015, 16 (Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT-16-May

26-28, 2015): 1-10.

[34] WANG C, CHU L, YAO Q, et al. Tuning the range, magnitude, and sign of the thermal expansion in intermetallic $Mn_3(Zn, M)_4N$ (M= Ag, Ge)[J]. Physical Review B, 2012, 85 (22): 220103.

[35] 王斌, 阎军, 程耿东. 特定方向"零膨胀"的最小柔顺性结构优化设计[J]. 计算力学学报, 2010, 27(4): 577-582.

WANG B, YAN J, CHENG G. Multi-objective optimization of low structural compliance and thermal directional expansion [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27 (4): 577-582.

《宇航材料工艺》征订启事

- 中国科学引文数据库核心期刊
- 中国中文核心期刊
- 中国科技论文统计源期刊
- 国际宇航文摘(IAA)、美国化学文摘(CA)、金属文摘(METADDEX)收录核心期刊

- 《宇航材料工艺》创刊于1971年,是国内外公开发行的国家级科技期刊
- 入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网及万方数据资源系统数字化期刊群等
- 在第二届国家期刊奖评比活动中获百种重点期刊奖
- 在航空航天领域高质量科技期刊分级目录中排在T3区
- 由航天材料及工艺研究所主办
- 主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践
- 主要栏目有:专论、综述、计算材料学、新材料新工艺、测试分析、工程实践、知识窗、科技信息、成果简介以及会议信息等

•适合于航空航天、冶金、石油化工、机械电子、轻工、汽车、造船等部门,从事材料工艺研究生产的科研技术人员、管理人员及高校师生阅读。

•中国标准连续出版物号 CN 11—1824/V, 国际标准刊号 ISSN 1007—2330, 双月刊102页, 国际大大16开本, 激光照排, 逢双月出版, 每期20.00元, 全年120.00元。

欢迎各界读者订阅!

本刊参加了天津半导体杂志社的联合征订,可汇款至天津半导体杂志社,邮编300220,注明“订阅《宇航材料工艺》,代号9769”。也可直接在编辑部、淘宝或微店订阅。

开户银行:工商银行北京东高地支行

账户名称:航天材料及工艺研究所,

账号:0200006509008800374(务必将订单与银行回执发到编辑部邮箱)

联系人:王琪 电话:010-68383267;传真:010-68383237 E-mail:703@china.com