

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2023.03.020

文献引用: 张永超, 李湘帆, 王娅萍, 等. 空间环境下磁性液体润滑/密封初探[J]. 润滑与密封, 2023, 48(3): 147-156.

Cite as: ZHANG Yongchao, LI Xiangfan, WANG Yaping, et al. A brief review of magnetic fluid lubrication/seal in space[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(3): 147-156.

空间环境下磁性液体润滑/密封初探^{*}

张永超^{1,2} 李湘帆^{1,2} 王娅萍^{1,2} 温明富^{1,2} 牛小东^{1,2}

(1. 汕头大学工学院 广东汕头 515063; 2. 汕头大学智能制造技术教育部重点实验室 广东汕头 515063)

摘要: 磁性液体(磁流体/磁流变液)作为一种新型磁控智能材料,兼具液体的流动性及固体磁性材料的磁响应特性,在外磁场作用下可实现二者间的可逆性转换。磁性液体润滑密封因其零泄漏、自修复等优良特性受到广泛关注,特别是近年来在航天装备中的应用研究。为探讨磁性液体在航天装备中的应用,从恶劣的宇宙环境出发,分析地外空间装备研发所面临的严峻环境挑战,对高真空、高辐射、高低温热循环三大主要问题进行针对性分析,探讨磁性液体用于航天装备润滑/密封的可行性,总结相关磁性液体极端工况润滑/密封技术的进展和局限性,并提出未来研究中亟待解决的重要科学问题。

关键词: 磁性液体; 润滑; 密封; 空间环境; 辐射; 真空; 热循环

中图分类号: TH136

A Brief Review of Magnetic Fluid Lubrication/Seal in Space

ZHANG Yongchao^{1,2} LI Xiangfan^{1,2} WANG Yaping^{1,2} WEN Mingfu^{1,2} NIU Xiaodong^{1,2}

(1. Engineering College of Shantou University, Shantou Guangdong 515063, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology(Shantou University), Ministry of Education, Shantou Guangdong 515063, China)

Abstract: As a kind of novel magnetic-controlled intelligent material, the magnetic liquid (magnetic fluid/magnetorheological fluid) combines the fluidity of liquid and magnetic response characteristics of solid magnetic material, which can realize the reversible transverse between them under external magnetic field. Magnetic fluids have attracted extensive attention due to their unique properties such as zero leakage and self-healing, especially as promising candidate material for advanced aerospace equipment. To discuss the application of magnetic fluid in aerospace equipment, focusing on the harsh cosmic environment, severe challenges faced by the aerospace devices including vacuum, radiation and thermal cycling were analyzed, and technique progress of magnetic fluid lubrication and seal applied in space devices in the past were reviewed. Both limitations of the prevail development and problems urging to be solved in future around the development of advanced lubrication/sealing devices for deep universal space were proposed.

Keywords: magnetic fluids; lubrication; seal; space radiation; vacuum; thermal cycling

近年来,我国空间探索工程快速稳步推进,从绕地运行的北斗卫星导航系统、“天宫号”载人空间站到“嫦娥”探月计划、“天问一号”火星探测项目成功开展,中国正逐步解开古人对宇宙“日月安属、列星安陈”的千古疑惑,实现“尽揽九天星河,扶

摇势、取北斗”的宏伟畅想。可以预见,随着太空探索的不断深入,空间飞行器和相应设备的研发也将面临更加严峻的技术挑战。在数年甚至数十年的工作期间,空间装备活动部件要保持长期高效高精度运行,离不开强大优异的润滑/密封技术提供支持和保障。不同于常规设备,空天装备具有工作环境苛刻、工作周期长、机构质能密度要求高、维护难度大等特点,除了载人飞行器上的部分系统外,其他部件在轨运行时其装备几乎不可能进行维护操作,一旦发生故障,极有可能危及整个任务的实施,造成难以估量的损失^[1]。另外,适应空间开发建设目的的空间机械臂

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (12172203)

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-05-18

作者简介: 张永超 (1997—),女,硕士研究生,研究方向为磁流体多相流理论及应用。E-mail: 21yczhang@stu.edu.

通信作者: 牛小东 (1969—),男,博士,教授,研究方向为磁流体多相流理论及应用。E-mail: xdnui@stu.edu.cn.

等大功率机械还对润滑/密封结构提出了“高速”、“精确”、“大承载”等新的技术要求。磁性液体作为一种新型磁控智能材料,通过将纳米级磁性颗粒分散于水基、油基或其他成分的载液中,形成的均质胶体具有独特流动性和磁致伸缩性,具有优异的润滑/密封性能。磁性液体的正式应用始于其成功地解决了宇航服活动关节密封及宇宙飞船失重状态下的液体输送问题^[2]。此后,其良好的物化性质使得磁性液体在轴承润滑/密封^[3-5]、阻尼减振^[6-8]、医疗器械^[9-11]等领域取得了迅猛的发展应用。

图 1 展示了一种常见的磁性液体润滑/密封结构。磁性液体被注入由永磁体、极片和轴构成的磁路中,填充极片和轴之间的间隙,形成若干液体“O”形环,保持润滑的同时也可起到一定的密封作用。磁性液体用于润滑/密封具有结构简单、寿命长、可控性强的特点,可实现域润滑进而有效减小摩擦;此外,磁性液体可实现润滑/密封一体设计,其所独有的自密封性、自修复性、自清洁性,是常规润滑剂/密封介质所不具备的颠覆性优势。

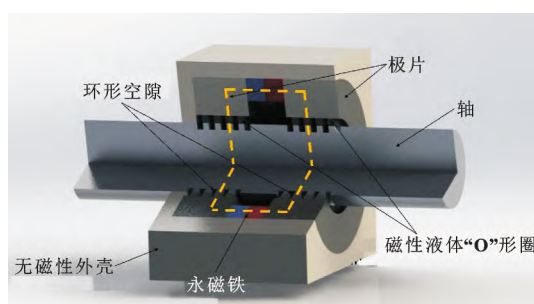


图 1 一种常用的磁性液体润滑/密封结构

Fig. 1 Typical magnetic fluid lubrication and seal structure

目前,相关文献对常规工况下的磁性液体润滑/密封已经有了较为详细的介绍^[3,10,12-19],但是对于磁性液体应用于空间飞行器润滑/密封问题的可行性研究较少。目前关于航天用金属密封和航天用常规润滑剂等领域的研究较多^[20-27],但是关于磁性液体用于航天器/航天设备润滑/密封的报道大多集中在早期的研究中,新近研究极少,可能是相关资料保密的原因。早期美国 JPL 实验室的研究人员^[28]认为磁性液体密封具有无磨损、零泄漏和速度范围广等三大优点,是解决空间动轴密封的有效方式之一。波音公司和 NASA 曾将铁磁性液体应用于空间站散热系统^[29]的转轴上,以防止液氮冷却剂泄漏,最终的磁性液体密封方案满足 360°可连续旋转、零泄漏、易维护、10 年无替换寿命设计、99% 可靠性以及磁性液体与氨不互

溶等多项要求。

磁性液体润滑的自回位性、自修复性以及润滑机制的改善,是其区别于其他润滑/密封策略的独特优势。首先,在磁性液体润滑/密封处,磁性液体的磁致伸缩性使得将要溢出的磁性液体介质自动“吸回”接触表面,起到自回位作用,可有效避免润滑剂逸散问题。其次,当压力过大导致出现密封泄漏或润滑失效后,若压力恢复到容许范围内,磁场作用会自动调整磁性液体分布,使其恢复到原始密封、润滑状态,可大幅降低设备维护难度。最后,一方面磁性液体中磁性颗粒的存在可利用滚珠效应将摩擦副之间的滑动摩擦转化为滚动摩擦,从机制上改善摩擦性能;另一方面,纳米级的磁性粒子沉积、填充在润滑表面的损伤纹理中^[30],对润滑表面摩擦磨损可起到修复作用,降低润滑面的表面粗糙度、增强润滑吸附性、延长系统寿命^[18,31]。另外,磁性液体在长期而广泛的工业实践中表现出的稳定优势和充分的技术积累,使其能够满足航天工业商用材料选择的保守性原则。

本文作者从宇宙空间的典型特征出发,考察空间润滑/密封问题所面临的要求和挑战,以相似环境下地表磁性液体润滑/密封应用进展作为参考,讨论磁性液体用于空间飞行器润滑/密封问题的可行性;最后根据磁性液体极端工况润滑/密封技术的当前进展和局限性,提出发展空间环境下的磁性液体润滑/密封所亟待解决的科学问题以及可能的研究方向。

1 空间环境

量化考虑空间环境的影响是航天设备研发的重要前提。1967 年,FAGAN 和 WILSON^[32]在讨论空间装备保障问题时,提出了 4 类对航天器和人类空间活动影响重大的环境参数,即失重、辐射、高真空和微流星体,并基于这 4 类参数阐述了空间环境对空间装备维护的影响,如表 1 所示。在真空失重状态下,设备的移动和存储需要以全新的方式考虑以便于适应新的环境。而辐射和微流星体高速撞击导致的航天器结构失效和破坏威胁,也必须加以认真考量。另外,FINCKENOR^[25]和 HOFZ^[28]的工作中还提到了航天器所面临的热循环问题。航天器在轨运行时反复穿越阳光照射和阴影区域,会经历大温度跨度的热循环过程。因此设计相对应的热控系统及管理策略则显得尤为重要。NASA 曾为 1968 年开启的 Apollo 应用项目(Apollo Application(AA) Program)提出了三类实验(地球相关数据收集、与外层空间环境有关的实验、探索永久载人空间站和星际飞行能力的基础实

验) 作为未来拓展空间飞行范围和延长任务时间的重要准备工作。另一方面, 宇宙空间广袤无垠, 空间环境变量的估计也不应一成不变^[32]。实际上, 仅就地球周围低、中、同步轨道而言, 也可明显看出主要环境影响因素的变化, 如图 2 所示^[33]。从图 2 中可以发现, 除一些普遍性存在的问题如太阳光照和真空

外, 随轨道高度的升高, 差异性变量经历了原子氧、范-艾伦带到太阳耀斑的变化。不仅如此, 即使单纯讨论空间辐射强度问题, 在范-艾伦带内、外运行的航天器也面临比低地球轨道运行的航天器更高的辐射水平^[25]。

表 1 空间环境的主要变量及影响^[32]
Table 1 Main variables and influences of space environment^[32]

环境变量	可能影响
失重	消除因扭矩或运动而产生的加速度 (束带, 乘员和设备的移动 & 固定, 螺栓、任务工具等紧固件的磁化储存等)
辐射	生物体所能承受的辐射剂量; 辐射导致材料失效或破坏
真空	有机材料结构的真空脆弱性, 尤其是在需要良好密封和润滑的运动表面上
陨石 & 微流星体	喷砂 (sandblasting); 撞击导致的壁面剥落; 陨石穿透导致的内部结构破坏

综合以上内容, 对空间环境影响进行量化, 一方面应考虑辐射、真空、热循环等环境参数, 另一方面也应充分关注环境变量水平随空间位置不同而产生的巨大差异。这需要进行大量的数据测量、收集工作, 并开展相对应的环境实验。地面观测站和现有仪器受到地球大气层的影响, 会产生不必要的背景噪声和其他污染。NASA 曾开发的用于环境预测的基本分析工具, 以及用于环境描绘和性能验证的测量系统^[34]或可作为借鉴, 以便于能够更好地了解自然环境和人造微环境对空间探索的影响。

最后, 环境因素的影响还应考虑航天器的任务周期问题。航天器的任务期可以分为 4 个不同的阶段: 发射前的地面操作阶段、发射阶段、返回再入地球大气层阶段和空间操作阶段。表 2 列出了各个阶段的环境特点, 并对可能出现的问题进行了举例^[35]。在进

行空间装备设计时, 应充分考虑整个任务期内航天器所处的环境变化, 以便于选择具有充分环境适应性和性能可靠性的结构和材料。

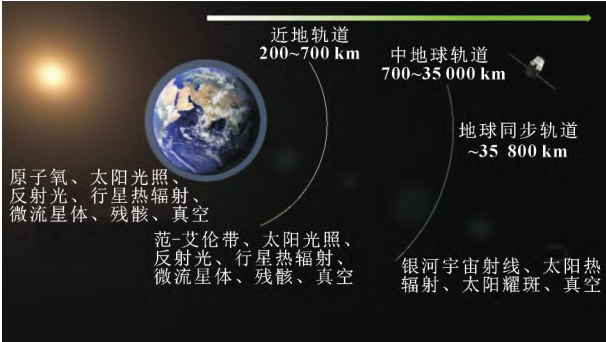


图 2 空间环境随轨道高度的变化情况^[33]
Fig. 2 Space environment vary with orbit height^[33]

表 2 航天器的 4 个任务阶段及特点^[35]
Table 2 Four phases and related characteristics of spacecraft mission^[35]

任务阶段	特点	举例
地面操作期 (发射前)	温度、湿度、大气压等影响材料的机械性能	热液诱发基体开裂
发射期	剧烈振动, 极大加速度导致	雷击、鸟撞、冰雹撞击等
再入 (大气层) 期	的高热通量和雨水侵蚀	
空间操作期	空间恶劣环境	辐射导致的材料变性; 大温差导致的热循环; 陨石撞击; 真空脱气

在外太空环境中,空间装备面临的首要威胁就是泄漏问题,故实现积极可靠的密封对航天任务的成功至关重要。而密封策略的选择需要重点考虑真空、温度和辐射对环境的影响,同时兼顾航天器在不同任务期内面临的环境变化情况,根据航天器要求的任务范围针对性设计相适应的润滑/密封策略。未来,空间装备承载性能的增长是大势所趋,大型、超大型空间结构在太空环境下的组装和发射任务要求更高推力的运载工具及更大承载能力的空间操作和运输装备。承载力的大幅提升严重考验机械结构的润滑能力,特别是在恶劣的空间环境下,润滑/密封失效将导致难以估量的后果。一个典型的因润滑设计不足出现问题的实际案例,是国际空间站上的太阳阿尔法旋转接头(Solar Alpha Rotary Joint, SARJ)失效事件。国际空间站上的 SARJ 用于支撑太阳能电池阵列进行姿态旋转以便于实现最大程度地接收光照,在任务过程中,滚动表面的氮化物涂层发生剥落,大量碎片和颗粒出现在空间站右舷 SARJ 处,相对左舷导致了额外的振动和动力消耗。此次故障导致的相应润滑系统的清理和复位工作,需要宇航员进行 3 次以上的太空行走才能完成。该事件引起了人们对航天器污染敏感表面的大面积开放表面润滑问题的关切,解决问题除了使用新型润滑剂外,还应从系统层面对摩擦行为和润滑状态(临界润滑、乏油润滑等)进行更加充分的了解^[25]。HUANG 和 WANG^[35]对基于 Neuringer-Rosensweig、Shliomis 和 Jenkins 三种流动模型的磁性液体润滑理论进行了分析讨论,提出磁性液体润滑轴承是空间微重力环境下的最佳选择;另外磁性阵列表面结构及离子液体基磁性液体凭借其突出性能,也展示出良好的应用前景。HU 等^[36]介绍了一种由磁性液体密封环封闭的气垫和磁性液体环联合承压机制,所提供的液-气支撑可有效降低摩擦、改善“冷焊”和“黏滑”现象,对发展精密滑动机械有重要意义。URRETA 等^[37]探讨了使用铁磁流体实现高精度主轴密封的可行性,并对所提模型的有效性进行了实验验证。

以上研究为发展空间环境下的磁性液体润滑密封提供了参考借鉴。磁性液体作为空间装备润滑剂的一大亮点是其卓越的自修复性。LEUNG 等^[30]对不同基液、不同磁性颗粒浓度的磁性液体在边界润滑状态下的流变特性和摩擦学效应进行了细致的试验分析,发现了磁性液体的自修复机制,证明了磁性颗粒可以通

过填充润滑表面磨损处减小有效表面粗糙度,实现润滑自修复目的。LAMPAERT^[18]在总结磁性液体润滑/密封进展时也提到了相似的现象,表达了这一奇妙的材料特性对解决系统寿命限制的良好预期。

在航天设备的密封问题上,公开资料中所提及的航天器常用密封手段有 O 形环密封、金属密封、发泡树脂、烟火成型、焊接密封和磁性密封等^[32]。其中磁性液体旋转密封的磁控特性使其能够摆脱宇宙失重影响,长期保持高精度、易调控的工作状态,相较传统密封手段具有低摩擦磨损、零泄漏、无污染、自修复和长寿命等巨大优势。磁性液体润滑/密封结构简单,组装、脱离灵活性强,可有效解决空间润滑/密封结构工作寿命长、日常维护难的问题,尤其是在小尺度密封问题上具有天然优势。李德才和钱乐平^[38]开发的高速磁性液体旋转密封可在 30 m/s 的线速度下保持良好的密封能力,大幅提高了磁性液体旋转密封线速度,成功解决了 20 kW 航天电机的高速密封问题;其团队针对极端环境下的维修维护难题所开发的分瓣式磁性液体旋转密封,使大型装备的密封拆装时间缩短为原来的 1/5,成功解决了军用雷达、反应釜等关键装备的密封难题,在行业内得到了广泛应用。

目前磁性液体在空间装备润滑/密封领域取得了一定进展,但磁性液体独有的卓越机械性能还未得到充分发挥,依然存在较大的提升空间。下文将就空间环境影响中较为严峻的高真空、高辐射和高低温热循环三类变量分别介绍特殊环境下的磁性液体密封/润滑研究进展,讨论磁性液体用于空间润滑/密封问题的可行性。

2 高真空和超高真空

高真空是空间润滑/密封技术面临的第一道挑战。地球海平面的真空度为 1.013 kPa,随轨道高度逐渐增大,真空度急剧减小,很快进入高真空状态($0.133 \sim 1 \times 10^{-6}$ Pa);近地轨道(200~700 km)真空度范围为 $10^{-4} \sim 10^{-10}$ Pa^[39],属于超高真空状态($10^{-6} \sim 10^{-10}$ Pa);而同步轨道(高度约 3 580 km)的真空度可达 10^{-13} Pa^[33],进入极高真空状态。高真空环境下,材料蒸发性大大增强,届时将面临大量潜在的不良影响,如材料中的挥发性成分蒸发,通过航天器周围的真空迁移容易导致太阳能电池板、传感器、光学组件等污染敏感系统的功能不良^[1];蒸发致使传统润滑剂薄膜和可充当润滑剂的吸附气体层消失,大幅增

加轴承和滑动表面的摩擦^[39]。因而对于真空环境的润滑问题需要采取特殊的设计方案。

在空间站、地外基地等太空宜居设施建设问题中, 一个关键点是在工作环境和空间真空环境之间实现零泄漏或至少限制泄漏, 避免温度损失、辐射及微生物污染; 同时还需要使结构具有一定的灵活性, 以便于进行必要的其他任务模块的对接和脱离, 如空间站部分舱段的组装和在太空发射用于星际航行的飞行器等任务。理想的真空密封材料需要满足低黏性、高表面张力 ($\geq 0.5 \text{ N/m}$)、低蒸汽压 (25°C 下 $< 10^{-10} \text{ N/m}^2$)、低熔点 (-50°C) 以及适合轴和壳体金属的“润湿”特性。另外真空环境下的密封材料还应尽可能久地保持密封面两侧的高压差, 实现装备的长寿命和长期可靠性^[28]。

高真空条件要求润滑/密封材料具备尽可能低的饱和蒸汽压, 可以通过改变磁性液体配方寻找符合要求的磁性液体。LI 和 RAJ^[40] 报道了烃基和氟碳基磁性液体在 4 种不同真空度下的测试结果, 发现真空蒸发速率明显高于大气条件下的蒸发速率, 并通过修正 Langmuir 方程对这一现象进行了理论解释。五环聚苯醚、甲苯硅油和二酯类物质^[13] 均具有相对较低的饱和蒸汽压, 可用作真空环境下的磁性液体基液。BLACK 等^[41] 对一种全氟聚醚 (PFPE-Perfluoropolyether) 基磁性液体进了表征, 研究表明, 该种磁性液体在真空环境下放置 1 h 后蒸汽压约为 $4 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, 5 h 后达到 $4 \times 10^{-9} \text{ Pa}$, 450 h 后达到 $4 \times 10^{-10} \text{ Pa}$, 在高温和磁场的联合作用下所使用的磁性液体具有低挥发性、长寿命和稳定性, 十分适合用于超高真空密封。离子液体基的磁性液体是航天用液体润滑剂的另一有力备选材料之一。离子液体是完全由离子组成的物质, 相较于传统载液, 其蒸汽压和可燃性均可忽略不

计, 具有相当的稳定性, 且其性质 (黏度、溶解度、熔点等) 可以通过多种类的离子组成方便地进行调节。部分离子液体还展现出特殊的对永磁铁的磁响应特性, 如图 3 所示^[42-43]。因此离子液体极为适合在极端物理化学条件下的设备中发挥作用, 特别是作为载体在制备太空装备用磁性液体方面具有良好的发展潜力^[42-44]。GUERRERO-SANCHEZ 等^[44] 和 OLIVEIRA 等^[45] 研究了一系列离子液体增强磁性液体的稳定性, 结果表明, 将离子液体作为载液可在不使用分散稳定剂的情况下实现磁性纳米颗粒的有效分散, 从而有望制备出具有高稳定性的磁性液体。其中 OLIVEIRA 等^[45] 还证明了所研究的离子基磁性液体对于高真空环境和低温环境 (如 -80°C) 的适用性, 进一步验证了离子液体基的磁性液体作为新型空间极端工况润滑剂的可行性。

氟碳基及离子液体基磁性液体是高真空环境中最具应用潜力的磁性液体。采用该离子液体基磁性液体, 单平和汤林军^[46] 发明了一种实心轴双法兰重载磁流体密封结构, 可实现 10^{-6} Pa 的真空承载力, He 泄漏率低于 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 最大承载力可达 24.5 N/cm , 相关技术指标见表 3; 该团队发明的另一种基于高饱和磁化强度 (0.74 T) 磁性液体的耐高压磁性液体旋转密封结构, 单个极齿耐压能力可达到 0.112 MPa , 真空压力可达 10^{-6} Pa , 泄漏率低于 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 适用温度为 $0 \sim 200^\circ\text{C}$, 一次注入磁性液体密封寿命达 10 年以上^[38], 为进一步研发适用于太空高真空极端环境的磁性液体润滑/密封结构提供了极具价格的参考。此外, 陈燕^[47] 以耐压值 $\geq 0.1 \text{ MPa}$, 寿命 ≥ 25 年为设计要求, 为空间站蒸汽压缩蒸馏装置设计了磁性液体密封方案, 并通过有限元分析和耐压计算验证了设计的合理性。



图 3 $[\text{HexMelm}]_3 [\text{Dy} (\text{SCN})_6 (\text{H}_2\text{O})_2]$ 对钕磁铁的响应^[42-43]

Fig. 3 Response of $[\text{HexMelm}]_3 [\text{Dy} (\text{SCN})_6 (\text{H}_2\text{O})_2]$ to a neodymium magnet^[42-43]

表 3 一种实心轴双法兰重载磁流体密封技术指标^[46]

Table 3 The technical indicators of solid shaft double flanges overloaded magnetic fluid seal^[46]

参数	各类型轴承参数值				
	JD020	JD025	JD030	JD040	JD050
许用扭矩传递 $T/(\text{N} \cdot \text{cm})$	5 850	10 130	16 210	32 420	58 010
真空承载力 p/Pa			10^{-6}		
允许氦泄漏 $L/(\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$			$<10^{-12}$		
压力承载力 $W/(\text{N} \cdot \text{cm}^{-1})$			25		
温度范围 $t/^\circ\text{C}$			$-10 \sim 90$		
			$-10 \sim 90$ (水冷结构可拓宽该温度范围)		
气体情况			无反应性气体		
轴承类型	7 206	7 207	7 208	7 210	7 212
	6 205	6 206	6 207	6 209	6 211

3 高辐射

复杂的辐射效应是空间任务需要解决的另一大难题。空间辐射的来源有宇宙射线、范-艾伦带、太阳耀斑、极光和人造结构等，图 4 中示意性地表示了地球周围空间的辐射来源以及地球周围的范-艾伦辐射带；表 4 中对部分辐射源进行了量化描述。可以看出，太空辐射来源复杂，辐射强度大且分布不均，范-艾伦辐射带的存在更是很大程度上限制了空间飞

行器绕地飞行的活动范围。外太空的高辐射环境不仅会对空间系统内的生物体产生致命威胁，同时也会损伤飞行器，导致设备故障等一系列不良影响。因此有必要设定空间装备的辐射许用标准并制定对应的保护措施。表 5 中给出了部分材料的辐射破坏阈值^[32]。可以看出陶瓷和金属类材料的耐辐射强度较高（ 10^9 J/kg ），有机物次之（ $10^4 \sim 10^6 \text{ J/kg}$ ），晶体管对辐射最为敏感。

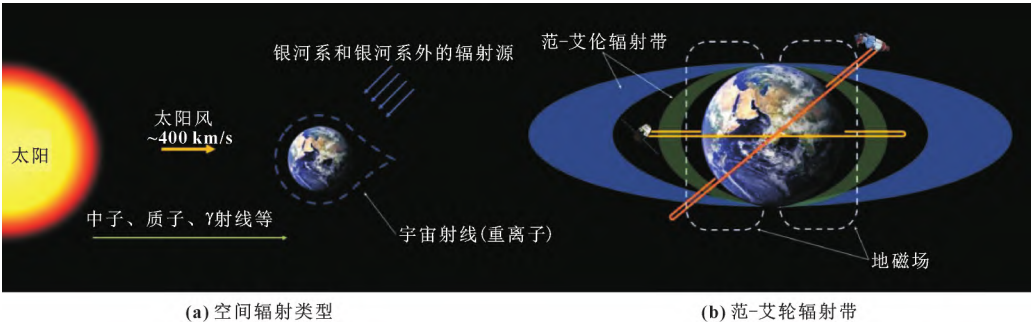


图 4 地球周围的空间辐射源
Fig. 4 Space radiation source: (a) types of pace radiation; (b) Van-Allen radiation belt

表 4 空间环境中的辐射因素

Table 4 Radiations in space environment

辐射种类	细节	能量情况
电离辐射	包含质子和高能电子	最高可达 MeV 量级
原子氧	与低轨道（航天飞机轨道高度为 200 km）有关	中性氧原子以约 8 km/s 的相对速度碰撞航天器时，相当 5 eV 的能量
紫外线辐射		约为太阳照明强度的 37%
人造物辐射	同位素热电发生器	设备外 1.52 m 处 10 年间的总 γ 剂量约 10^2 J/kg

表 5 部分材料的临界辐射剂量^[32]
Table 5 Critical radiation dose of some materials^[32]

材料/组分	辐射剂量 [*] $D/(J \cdot kg^{-1})$
晶体管	100
玻璃	5 000
聚四氟乙烯	1×10^4
透明合成树脂	3×10^4
丁基橡胶	2×10^5
天然橡胶	3×10^5
有机液体	1×10^6
石墨	1×10^6
聚乙烯	1×10^6
碳氢油	5×10^6
陶瓷	1×10^9
碳素钢	2×10^9
不锈钢	5×10^9
铝合金	1×10^{10}
宇航服材料	
氯丁橡胶	1×10^4
尼龙	5 000

注：* 对功能的相关属性产生明显改变的剂量。

空间飞行器在轨工作时间长，经年累积的辐射量足以对装备结构造成严重破坏。空间高辐射条件下，润滑介质稳定性难以长期保持；同时受高温和高辐射影响，还容易出现因蒸发或潜变而导致的衰败；另外润滑部件通常会经历严重的边界润滑状态，也是润滑设计中一个不可忽视的问题。故急需开发有效的新型润滑剂作为抗磨剂来延长这些部件的寿命。目前空间中常用的液体润滑剂有全氟聚醚、多烷基化环戊烷（MAC - Polyalkylated Cyclopentane）和聚 α 烯烃（PAO - Polyalphaolefin）等，常用的固体润滑剂包括二硫化钼、二硫化钨、二硒化铌、石墨、银、聚四氟乙烯和尼龙等^[25]。考虑辐射效应对航天器材料的影响时，就最广泛使用的金属、金属化合物以及多聚物而言，有两个问题需要特别关注。一是常规多聚物和有机物材料对空间辐射直接接触敏感，容易导致材料因变性而失效，无法满足空间任务长寿命、少维护的设计原则。有机硅、苯乙烯-丁二烯、异戊二烯和天然橡胶等虽然表现出良好的真空性能，但无法良好地应对强烈、复杂的宇宙辐射，不是最佳的材料选择。另一方面，空间辐射和真空虽然无法对金属、合金及其氧化物造成明显影响，但可能会出现材料剥落形式的破坏，这使得金属密封、焊接密封的可靠性受到了质疑。相较之下，磁性液体润滑/密封是解决这一问

题的良好方案。区别于其他润滑剂和密封介质，磁性液体主要由磁性纳米粒子、表面活性剂和基载液组成，磁性纳米粒子被合适的表面活性剂包覆后，可分散在基载液中形成极为稳定的胶体体系，可以保持长期稳定性。虽然磁性液体也存在一定程度的因辐射导致的潜变问题，但可以通过调控化学组成（载液和添加剂等）、制备参数及其他相关条件进行改善。表 6 给出了部分材料的辐射降解阈值^[28]，可以看出磁流体密封的耐辐射值要远高于常用的 O 形圈密封和 V 形环密封，而与迷宫密封的耐辐射强度相当，耐辐射性能优异。如李德才团队^[38]开发的基于全氟聚醚酸表面活性剂的全氟聚醚油基磁性液体，表现出优良的密封性能，实际测得该磁性液体旋转密封在放射性活度为 3.75×10^{11} Bq 的强辐射环境下的泄漏率低于 1×10^{-12} Pa \cdot m³/s，达到零泄漏标准，具有高度稳定性。

表 6 部分密封结构指标^[28]
Table 6 Properties of some seal schemes^[28]

密封材料	密封类型	允许 γ 剂量 $D/(J \cdot kg^{-1})$
氟橡胶	O 形圈密封	10^4
聚四氟乙烯 (TFE)	V 形环密封	10^3
氯苯基甲基聚硅氧烷	迷宫密封	$< 10^6$
硅酸盐酯	磁流体密封	$< 10^6$
全氟烷基聚醚	磁流体密封	$< 10^6$

4 低温/热循环

发展空间磁性液体润滑/密封还需要考虑宇宙空间的极端温度。外太空飞行器设计服役期长，任务活动范围广，航天器在轨运行时反复穿越光照和阴影区域，会经历频繁而强烈的热循环。有数据显示，在地球同步轨道上的一项为期 30 年的飞行任务中，航天器直接暴露于太阳光和黑暗中的表面经历了超过 104 次的温度循环^[1]。高低温热循环会导致材料出现剥落、龟裂、分层和其他机械问题，尤其是在热膨胀系数不一致的组件中^[25]。另外热循环问题还与航天器姿态、组件热光学特性、工作散热情况息息相关。具体而言，航天器热循环主要受到五类因素影响，即：（1）贯穿整个任务期的光照强度；（2）航天器部件相对航天器的位置（是否进行主动温控或依赖太阳）；（3）是否进行加热及加热方式；（4）是否在辅助推进发动机附近；（5）航天器本身影响热传导和热辐射的外形因素^[28]，太阳光吸收率及红外发射率等^[25]。由于进行主动温度控制会增加能量载荷（需增加电池容量、太阳能帆板尺寸或更大的放射性同位素热发生器等），从而增加航天器质量，降低系统可

靠性^[28]。鉴于此,寻找高耐温疲劳性的材料,设计相对应的热控系统及热管理策略就显得尤为重要。

1972 年, HOFZ^[28]介绍了用于方向和定位控制的外部空间旋转式制动器轴密封技术,设计要求致动器必须具备在 149 ℃ 以上的温度域内正常工作和非任务期短途漂浮的能力,其中轴密封和润滑问题正是制约致动器工作和生存温度范围的主要因素之一。传统 O 形圈密封性能优良,然而对辐射、宽温域热循环耐受性较差,故需要寻找更加可靠的润滑/密封技术。

HOFZ^[28]考察了 3 种类型的致动器及备选密封方式,见表 7,最终确定各制动器的润滑/密封方案。一般而言,非接触式密封摩擦磨损程度较低,因而具有相对更长的循环寿命。磁性液体密封作为一种非接触式密封,可以达到气密封的泄漏要求,在低温下发生冻结时依然能保持其密封完整性,同时解冻后不影响正常工作性能,因此磁性液体经常用于真空室间的连接密封。

表 7 轴密封初步候选方案^[28]
Table 7 Preliminary candidate shaft seals^[28]

方案	高扭矩旋转轴致动器	线性致动器	射流叶片旋转致动器
1	O 形圈密封	O 形圈密封	O 形圈密封
2	V 形环密封	V 形环密封	V 形环密封
3	面密封	迷宫密封	表面张力
4	表面张力	金属波纹管密封	迷宫密封
5	迷宫密封		管状弹性体密封
6	管状弹性体密封		磁流体密封
7	磁流体密封		
筛选结果	方案 1、2、5、7	方案 3、4	方案 4

虽然磁性液体密封需要进一步测试和评估其在高低温循环下的运行可靠性和寿命,但依然可作为高扭矩旋转轴致动器的候选密封方式^[28]。在宽温域适用的磁性液体开发方面,全氟醚基磁性液体^[48-50]是一种当前较为理想的方案,该磁性液体可在 -70 ~ 200 ℃ 温度区间内正常工作。除此之外,研究人员开发的宽温域磁性液体还包括 -10 ~ 90 ℃ 温度范围的高承载力磁性液体^[46]、0 ~ 200 ℃ 温度范围的耐高压磁性液体^[38]等。

除温度变化外,宽温域高低温循环所产生的影响还包括润滑剂启动力矩的变化。早期研究曾认为,制约磁性液体应用于空间设备密封结构的因素在于磁性液体密封受温度的影响较大,在温度较高 (> 149 ℃) 时,磁性液体挥发率大幅升高;而温度较低时,磁性液体则表现出黏性阻力,导致启动力矩比工作力矩增大数倍以上。陈燕^[47]从理论和实验角度探讨了温度对磁性液体润滑启动力矩的影响,发现在 25 ℃ 以上,磁性液体润滑的起动转矩变化不明显;但随温度缓慢降低,启动力矩不断增大。程艳红等^[51]从颗粒团聚和剪切稀化等微观影响机制等方面进行了分析,表明磁黏效应是启动力矩改变的本质原因。而除了开发具有低启动力矩的磁性液体,也可考虑通过在设备停车期间间歇性激活密封,以电磁铁代替永磁体

在静置期设置感应交变磁场等方式^[52],达到降低设备启动力矩的目的。

5 结论

磁性液体在早期的航天任务中发挥了重要作用,随着相关研究工作的不断深入新和完善,磁性液体用于极端工况特别是航天器润滑/密封的可行性不断增强。目前,国内外对常规工况下磁性液体润滑/密封问题的研究已取得丰硕成果,但极端环境下尤其是航天用磁性液体润滑/密封理论研究仍极为缺乏。然而在高性能磁性液体开发方面,已研发出一些性能优良的磁性液体,可作为航天用润滑/密封介质的备选方案,如离子液体基磁流体、全氟聚醚油基磁性液体等。

未来,针对空间环境下的磁性液体润滑/密封问题,值得重点关注的研究方向有以下几点:

(1) 需要制定规范通用的地外空间环境量化标准,以便于为空间润滑/密封设计建立可靠的环境影响分析模型。

(2) 开发适用于真空失重、高辐射、高低温等极端环境的润滑/密封用磁性液体,研究其制备工艺及对应的性能调控方法。

(3) 开展极端工况下磁性液体的润滑/密封理论研究,加强配套的多物理场磁性液体仿真和软件开发。

整体来看,磁性液体应用于空间环境下航天器润

滑/密封前景广阔,可以预见一旦通过充分的可靠性测试,磁性液体大规模应用于航天工业,将带来巨大的经济效益。

参考文献

- [1] HARUVY Y. Radiation durability and functional reliability of polymeric materials in space systems [J]. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part C Radiation Physics and Chemistry, 1990, 35(1/2/3): 204-212.
- [2] STEPHEN P S. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles: US3215572 A [P]. 1965-11-02.
- [3] 熊乐, 胡瑞, 许春霞, 等. 磁流体润滑特性及其在轴承中的应用研究进展 [J]. 轴承, 2020(7): 61-67.
XIONG L, HU R, XU C X, et al. Research progress on lubricating characteristics of magnetic fluid and its application in bearings [J]. Bearing, 2020(7): 61-67.
- [4] 赵辉, 崔传辉, 王优强. 不同供油条件下磁流体润滑渐开线直齿圆柱齿轮摩擦性能分析 [J]. 燕山大学学报, 2021, 45(1): 11-16.
ZHAO H, CUI C H, WANG Y Q. Friction performance analysis of involute spur gear lubricated by MHD under different oil conditions [J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(1): 11-16.
- [5] 菅光霄, 王优强, 于晓, 等. 齿轮磁流体润滑与动力学耦合研究 [J]. 摩擦学学报, 2021, 41(3): 325-333.
JIAN G X, WANG Y Q, YU X, et al. Coupling on ferrofluid lubrication and dynamics of gear system [J]. Tribology, 2021, 41(3): 325-333.
- [6] 刘旭辉, 胡慧娜, 宋浩然, 等. 可控阻尼磁流体轴承的振动控制性能研究 [J]. 制造技术与机床, 2021(8): 155-160.
LIU X H, HU H N, SONG H R, et al. Study on vibration control performance of controlled damped magnetic fluid bearing [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(8): 155-160.
- [7] 刘旭辉, 孙璐婵, 杨光, 等. 可控阻尼磁流体滑动轴承的设计及减振性能研究 [J]. 润滑与密封, 2020, 45(3): 93-96.
LIU X H, SUN L C, YANG G, et al. Design and performance study of controllable damping ferrofluid bearing [J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(3): 93-96.
- [8] 王成, 芮晓光, 芮延年. 高压消防水泵磁流体与机械动静态复合密封技术的研究 [J]. 现代制造工程, 2021(2): 152-158.
WANG C, RUI X G, RUI Y N, et al. Study on the dynamic and static sealing technologies of high-pressure fire pump combined with magnetofluid and machinery [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(2): 152-158.
- [9] HUANG J, RUI Y, JIANG X, et al. Research on sealing technology of magnetic fluid in medicinal high-speed grinder gearbox [J]. Advanced Materials Research, 2012, 433/434/435/436/437/438/439/440: 600-605.
- [10] KOLE M, KHANDEKAR S. Engineering applications of ferrofluids: a review [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 537: 168222.
- [11] 王珂, 张宏波, 安博, 等. 磁流体的非均匀分布对磁感应热疗温度场的影响 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(4): 40-46.
WANG K, ZHANG H B, AN B, et al. Effect of non-uniform distribution of the magnetic induction of the magnetic fluid hyperthermia temperature field [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(4): 40-46.
- [12] SÄYNÄTJOKI M, HOLMBERG K. Magnetic fluids in sealing and lubrication—a state of the art review [J]. Journal of Synthetic Lubrication, 1993, 10(2): 119-132.
- [13] 李德才. 磁性液体理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [14] 王瑞金, 王常斌. 磁流体技术的工业应用 [J]. 力学与实践, 2004, 26(6): 8-13.
WANG R J, WANG C B. The industrial applications of the magnetic fluid technique [J]. Mechanics and Engineering, 2004, 26(6): 8-13.
- [15] 王虎军. 磁性液体在密封中的应用研究 [J]. 数字化用户, 2013(23): 35.
- [16] 杨金霖, 黄巍. 磁性液体润滑技术的进展简述 [J]. 表面技术, 2017, 46(6): 61-68.
YANG J L, HUANG W. Progress of magnetic fluids lubrication technology [J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 61-68.
- [17] 李德才, 郝都. 磁性液体旋转密封的关键问题研究进展 [J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(7): 564-574.
LI D C, HAO D. Major problems and solutions in applications of magnetic fluid rotation seal [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38(7): 564-574.
- [18] LAMPAERT S G E. Magnetic fluid bearings & seals: methods, design & application [D]. Delft: Delft University of Technology, 2020.
- [19] SIMONIS S, HAUSSMANN M, KRONBERG L, et al. Linear and brute force stability of orthogonal moment multiple-relaxation-time lattice Boltzmann methods applied to homogeneous isotropic turbulence [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2021, 379(2208): 20200405.
- [20] CENTER N L R. Space Transportation System Technology [R]. NASA8-99060, 1970.
- [21] VERHEYDEN L, KLEIN K. New metallic seals for high and ultra-high vacuum: description and performances [J]. Vacuum, 1971, 21(9): 401-411.
- [22] CHARLES V E. Lubrication of spacecraft mechanisms [J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1993, 14: 68-75.
- [23] FUSARO R. Lubrication of space systems [J]. Lubrication Engineering, 1995, 51: 182-194.
- [24] 王晓旭, 林冠宇, 曹佃生. 空间长寿命球轴承的弹流润滑与密封分析 [J]. 润滑与密封, 2015, 40(7): 110-114.
WANG X X, LIN G Y, CAO D S. Analysis of elastohydrodynamic lubrication and sealing of long-life space ball bearing [J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(7): 110-114.
- [25] FINCKENOR M M. Materials for spacecraft [C] // Proceedings

- of Aerospace Materials and Applications. Reston, Virginia: AIAA, 2018: 403–434.
- [26] ZHONG A, YAO P, XIAO Y et al. Research status and developing trend of space tribology and tribological materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(2): 88–99.
- [27] HE W T, WANG S P, ZHANG C et al. Lubrication and wear characteristics of mechanical face seals under random vibration loading [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(6): 1285.
- [28] HOTZ G M. Survey of actuator shaft sealing techniques for extended space missions [R]. NASA-CR-130927, 1972.
- [29] HEIZER B, GOO S, RHODES G et al. A steerable radiator for spacecraft application [C]//Proceedings of 4th Thermophysics and Heat Transfer Conference. Boston, MA. Reston, Virginia: AIAA, 1986: 1298.
- [30] LEUNG W C, BULLOUGH W A, WONG P L et al. The effect of particle concentration in a magneto rheological suspension on the performance of a boundary lubricated contact [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2004, 218(4): 251–264.
- [31] 赵晶晶, 王优强. 冲击载荷下不同载液磁流体直齿圆柱齿轮的弹流润滑数值分析 [J]. 机床与液压, 2019, 47(22): 20–23.
- ZHAO J J, WANG Y Q. Non steady state EHL analysis of impact load in involute spur gear under different carrier fluid ferrofluid [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(22): 20–23.
- [32] FAGAN T L, WILSON M A. Maintainability in Space: a survey [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1967, R-16(1): 52–61.
- [33] RAWAL S P, GOODMAN J W. Composites for spacecraft [M]//Comprehensive Composite Materials. Amsterdam: Elsevier, 2000: 279–315.
- [34] MAY M, RUPAKULA G D, MATURA P. Non-polymer-matrix composite materials for space applications [J]. Composites Part C: Open Access, 2020, 3: 100057.
- [35] HUANG W, WANG X. Ferrofluids lubrication: a status report [J]. Lubrication Science, 2016, 28(1): 3–26.
- [36] HU Z D, WANG Z, HUANG W et al. Supporting and friction properties of magnetic fluids bearings [J]. Tribology International, 2019, 130: 334–338.
- [37] URRETA H, AGUIRRE G, KUZHIR P et al. Seals based on magnetic fluids for high precision spindles of machine tools [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(4): 495–503.
- [38] 李德才, 钱乐平. 分瓣式磁性液体密封装置的密封方法: CN102537366B [P]. 2014-07-09.
- [39] SINGLETARY J B, RITTENHOUSE J B. The effects of space environment on structural materials [C]//Proceedings of SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA: SAE International, 1966.
- [40] LI Z, RAJ K. Effect of vacuum level on evaporation rate of magnetic fluids [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 289: 43–46.
- [41] BLACK T, RAJ K, TSUDA S. Characterization of an ultra-low vapor pressure ferrofluid [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 39–42.
- [42] TORIMOTO T, TSUDA T, OKAZAKI K I et al. New frontiers in materials science opened by ionic liquids [J]. Advanced Materials, 2010, 22(11): 1196–1221.
- [43] MALLICK B, BALKE B, FELSER C et al. Dysprosium room-temperature ionic liquids with strong luminescence and response to magnetic fields [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2008, 47(40): 7635–7638.
- [44] GUERRERO-SANCHEZ C, LARA-CENICEROS T, JIMENEZ-REGALADO E et al. Magnetorheological fluids based on ionic liquids [J]. Advanced Materials, 2007, 19(13): 1740–1747.
- [45] OLIVEIRA F C C, ROSSI L M, JARDIM R F et al. Magnetic fluids based on γ -Fe₂O₃ and CoFe₂O₄ Nanoparticles dispersed in ionic liquids [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2009, 113(20): 8566–8572.
- [46] 单平, 汤林军. 一种实心轴法兰式重载磁流体密封装置: CN217301590U [P]. 2022-08-26.
- [47] 陈燕. 空间站蒸汽压缩蒸馏装置磁性液体密封的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- CHEN Y. The study of magnetic fluid sealing of vapor compression distillation system in space station [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [48] 韩世达, 崔红超, 张志力等. 磁性液体制备方法及其几类特种磁性液体简介 [J]. 功能材料, 2021, 52(10): 10061–10068.
- HAN S D, CUI H C, ZHANG Z L et al. Preparation of magnetic fluids and introduction of several special magnetic liquids [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(10): 10061–10068.
- [49] 陈彪, 隆泉, 郑保忠. 磁性离子液体的应用研究 [J]. 化学进展, 2012, 24(S1): 225–234.
- CHEN B, LONG Q, ZHENG B Z. Application of magnetic ionic liquids [J]. Progress in Chemistry, 2012, 24(S1): 225–234.
- [50] 刘汉勇, 颜招强, 陈芳. 氟醚油基磁性液体及其密封相关性 [J]. 磁性材料及器件, 2020, 51(4): 50–54.
- LIU H Y, YAN Z Q, CHEN F. The perfluoropolyether oil based ferrofluid and its sealing-related properties [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2020, 51(4): 50–54.
- [51] 程艳红, 李德才, 戴荣坤. 氟醚油基磁性液体密封启动力矩的实验分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(8): 1316–1321.
- CHENG Y H, LI D C, DAI R K. Experimental analysis of starting torque of perfluoro polyethers-based magnetic fluid seal [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(8): 1316–1321.
- [52] CHENG Y H, LI D C, LI Z K. Influence of rheological properties on the starting torque of magnetic fluid seal [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(3): 1–8.