



全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料的空间环境效应及其性能演化研究

白艳艳¹, 吕宏宇², 王珂², 范琳³, 刘长庆³, 蔡美荣^{1,3*}, 周峰¹, 刘维民¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所, 兰州 730000

2. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100000

3. 山东省烟台先进材料与绿色制造实验室, 烟台 264000

* E-mail: caimr@licp.cas.cn

收稿日期: 2025-09-30; 接受日期: 2025-11-10; 网络版发表日期: 2025-11-27

国家重点研发计划(编号: 2021YFA0716304)、中国载人航天工程空间应用系统资助项目(编号: KJZ-YY-WCL02)和国家自然科学基金(批准号: 52405237, 52535004, U23A20623)资助项目

摘要 在空间探索与开发任务中, 润滑技术是保障航天器机械系统稳定运行、延长设备寿命、确保任务成功的关键技术之一. 在各类空间液体润滑材料中, 全氟聚醚(perfluoropolyether, PFPE)润滑油凭借其卓越的化学稳定性和热稳定性, 成为空间应用最广泛的润滑材料之一. 然而, PFPE润滑油表面张力较低, 易在机械界面发生爬行、迁移行为, 进而影响了空间设备的运行可靠性. 为解决这一问题, 本研究针对空间用Z型PFPE润滑油, 设计并制备了一种氟功能化凝胶因子, 成功发展了一种介于润滑油、脂之间的类固体全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料, 其主要是凝胶因子通过分子间的非共价相互作用自组装形成有序的网络结构, 实现对PFPE油的有效束缚. 该超分子凝胶润滑材料具备优异的热可逆性与触变性: 在高温或高剪切作用下转变为流动溶胶态, 实现润滑功能; 在低温或静置/低剪切下恢复为类固体凝胶态, 实现密封功能, 满足空间设备对润滑与密封的双重需求. 为验证该材料在真实空间环境下的性能演化和损伤机制, 在中国空间站舱外材料暴露平台开展了为期6个月的舱外暴露实验, 并辅以地面模拟实验进行对比. 对下行样品进行结构与性能分析, 结合地面匹配实验, 揭示了空间环境因素对超分子凝胶润滑材料的结构性能演化影响规律和损伤机制. 实验结果表明, 尽管下行超分子凝胶样品表面发生轻微氧化, 但其物理化学性能未受显著影响, 其热稳定性还有所提升, 流变学性能(如黏弹性、剪切稀化及蠕变恢复)保持良好. 尤其重要的是, 与暴露之前的原始样品相比, 其摩擦系数和磨损量相当, 仍然保持优异的润滑性能. 本研究为超分子凝胶润滑材料在空间机械运动部件中的应用提供了理论与技术支撑, 为航天事业发展储备了新的润滑材料和技术.

关键词 空间舱外暴露, 全氟聚醚润滑材料, 超分子凝胶, 空间环境效应, 润滑性能

引用格式: 白艳艳, 吕宏宇, 王珂, 等. 全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料的空间环境效应及其性能演化研究. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 2014–2030
Bai Y Y, Lyu H Y, Wang K, et al. The space environment effects and performance evolution of perfluoropolyether-based supramolecular gel lubricants (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 2014–2030, doi: [10.1360/SST-2025-0287](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0287)

1 引言

航天器运行于高真空、微重力、极端温变及强辐射等多重因素耦合作用的空间环境, 该复杂苛刻环境对其核心运动部件所需润滑材料的性能指标提出了更为严格的技术约束^[1-3]. 在这类特殊的环境中, 烃类润滑油极易发生挥发流失、分子聚合或化学分解等问题, 难以有效确保航天器的稳定运行. 而全氟聚醚(perfluoropolyether, PFPE)润滑油凭借其独特的全氟化分子结构, 在耐高温特性、抗真空挥发能力及耐辐射稳定性等关键技术指标方面, 展现出不可替代的核心性能优势, 为高端工业领域的严苛工况提供了重要技术支撑^[4-7]. PFPE润滑油展现出优异的极端温度适应性, 在太空环境复杂的高低温交变工况下, 仍能保持稳定的润滑性能, 从而为相关机械部件的可靠运行提供有效保障. 在真空环境适应性方面, PFPE润滑油具有极低的蒸发性和饱和蒸汽压, 能够有效避免高真空环境下因挥发导致的润滑失效风险, 为真空环境下设备的稳定运行提供坚实支撑^[8,9]. 从抗侵蚀能力维度分析, PFPE油依托其强C-F键分子结构, 可有效抵御原子氧、辐射及各类腐蚀性介质的侵蚀作用; 与此同时, 该类润滑油能够为航天器部件提供防护, 使其免受高湿度、强氧化环境的损害, 进而显著提升部件在恶劣环境下的耐受能力与稳定性^[10,11]. 在安全性与长效性方面, 该润滑油具有低毒性特性, 完全适配航天器密闭空间的使用需求, 可避免对航天器内部环境及设备造成不良影响; 此外, 其出色的氧化安定性能够保障部件在整个在轨周期内持续获得稳定润滑, 大幅降低航天器在轨运行期间的维护风险与成本, 为航天器的长期可靠运行奠定重要基础. 自20世纪60年代以来, 美国杜邦公司首次将PFPE油应用于“阿波罗”载人航天计划并取得成功后, 该类润滑材料凭借优异的环境适应性与可靠性, 已逐步发展成为国际航天领域润滑系统中的标准配置, 广泛支撑各类航天器的在轨长期服役需求.

然而, PFPE油因表面张力偏低, 致使其在润滑界面易发生爬移、迁移现象, 该问题不仅会造成昂贵资源的浪费, 还可能引发零部件污染, 对设备正常运行构成潜在影响. 因此, 需要对PFPE油进行改性, 利用新型的超分子凝胶润滑材料技术对其进行变革性的创新和改造. 超分子凝胶润滑材料是一类通过非共价键(如

氢键、 π - π 堆积、主-客体相互作用等)或共价键(如动态共价键)驱动自组装过程, 构建而成的具有复杂拓扑结构的有序网络功能材料. 该材料基于其独特的网络结构, 能够对液体介质(包括水基、油基润滑材料等)产生物理限域效应, 最终形成一种兼具液体流动性与固体形态特征的凝胶态润滑体系, 其物理形态介于传统润滑油与润滑脂之间^[12-14]. 在当前的研究进展中, 以适用于普通工况的烷烃类润滑油作为基础原料, 科研团队已成功完成多种超分子凝胶润滑材料的优化设计及研制工作. 这些研究进展在技术层面呈现出多维度的创新突破, 涵盖宽温域超分子凝胶润滑材料、抗辐照超分子凝胶润滑材料及耐高温超分子凝胶润滑材料等多个关键研究方向, 为满足特殊工况下复杂多变的润滑需求提供了多元化且切实可行的解决方案^[15,16]. 在超分子凝胶润滑材料体系中, 凝胶因子通过自组装形成的有序网络结构, 能够对润滑油产生显著的自约束效应, 其可有效阻滞润滑油发生爬移、迁移等现象, 进而从源头减少资源浪费, 降低对环境造成的污染风险, 为润滑材料的高效、环保应用提供结构层面的支撑^[17]. 此外, 超分子凝胶润滑材料展现出优异的自适应性: 呈类固体状态的凝胶态, 在高温环境或机械力作用下, 可转变为具备流动性的液态; 而当温度降低或剪切停止时, 其又能可逆地恢复至初始的类固体凝胶态. 该特性确保超分子凝胶润滑材料在摩擦过程中, 能够响应摩擦热与剪切力的协同作用, 快速发生相态转变, 由凝胶态转化为具备良好流动性的液态形式. 转变后的液态润滑材料可迅速迁移至摩擦副表面, 高效发挥润滑功能; 与此同时, 处于接触边缘区域的超分子凝胶润滑材料则持续维持密封效能, 有效阻断润滑油的爬移、迁移通道, 保障润滑系统的稳定性.

随着超分子凝胶润滑材料与技术的持续创新及相关体系的不断完善, 一类针对航天装备运动机构或部件使用的以PFPE润滑油为核心基质的超分子凝胶润滑材料被设计和发展^[17]. 通过对凝胶因子分子结构进行氟功能化修饰策略, 以C-F键替换分子骨架中大量C-H键, 显著改善了凝胶因子在PFPE油(FOMBLIN Y25/6)介质中的溶解性能; 同时, 借助酰胺键官能团的引入, 有效诱导凝胶因子在PFPE油体系中发生分子间自组装过程, 成功构筑了具有良好热力学稳定性的全氟聚醚基超分子凝胶润滑材料. 然而, 这类材料在真

实空间环境下的长期性能演化规律和损伤机制尚不明确。基于此, 本研究以空间用Z型PFPE润滑油为研究对象, 设计并制备了全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料。利用中国空间站舱外材料暴露平台, 在国际上首次开展了为期6个月的含液超分子凝胶润滑材料的舱外暴露实验, 样品随“神舟十七号”返回地面。本研究系统分析了下行样品的结构与性能演变规律, 并结合地面模拟实验, 揭示了空间环境对超分子凝胶润滑材料的损伤机制, 为我国航天事业的发展储备了新的润滑材料和技术。

2 实验

2.1 凝胶因子的制备

以1H,1H,2H,2H-全氟-1-癸醇与六亚甲基二异氰酸酯为原材料。具体制备流程如下: 在250 mL的圆底烧瓶中加入0.02 mol的1H,1H,2H,2H-全氟-1-癸醇与100 mL乙腈, 在60℃条件下, 搅拌10 min, 加入0.01 mol的六亚甲基二异氰酸酯, 加入1~2滴二月桂酸二丁基锡, 反应12 h后, 采用乙腈洗涤三次, 烘干后得到白色粉末状凝胶因子。

2.2 超分子凝胶润滑材料的制备

选用空间机械运动机构或部件广泛使用的Z型PFPE油作为介质, 按以下步骤制备超分子凝胶润滑材料: 凝胶因子的质量比为3%, 称取0.31 g的上述凝胶因子, 加入10 g的Z型PFPE中, 在温度为160℃~180℃的条件下, 搅拌至凝胶因子完全溶解于PFPE油中; 冷却至室温后得到类固体的空间用超分子凝胶润滑材料。

2.3 实验方法

利用中国空间站舱外材料暴露平台对超分子凝胶润滑材料开展长达6个月的舱外暴露实验, 考察其空间环境效应与性能稳定性。同时, 利用中国科学院兰州化学物理研究所的地面模拟空间环境实验平台, 分别研究了超分子凝胶润滑材料与Z型PFPE油在高真空环境下原子氧辐照对润滑材料的损伤机制。其中, 原子氧辐照的通量控制在 6×10^{15} atoms/(cm² s)左右, 辐照时间为3 h, 通过地面高通量短时间的原子氧辐照获得空间低通量长时间的同等辐照量。采用真空摩擦试验机对辐照前后样品及下行样品的摩擦学性能进行评价,

实验条件设定为: 真空度 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa, 载荷5 N, 频率5 Hz, 振幅5 mm。

3 空间全氟聚醚超分子凝胶润滑材料的设计制备

本研究参考已有文献报道的合成方法, 成功制备出一种氟功能化凝胶因子(其化学结构及合成路线详见图1(a))^[17]。为提升该凝胶因子在PFPE油中的溶解性能, 本研究通过C-F键替代分子结构中的大部分C-H键; 与此同时, 通过合理设计并引入酰胺键官能团, 为凝胶因子在润滑油体系中的自组装过程提供了核心驱动力。在酰胺键所形成氢键的作用下, 凝胶因子于PFPE油体系中发生自组装, 进而构建出复杂有序的网络结构。该网络结构能够对润滑油产生空间限域效应, 通过对润滑油分子的有效束缚, 最终使整个体系转化为类固体状态的全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料。

所制备的超分子凝胶润滑材料呈现出优异的自适应性性能, 该性能具体通过温度、机械力响应性得以体现(如图1(b)和(c)所示)。在温度响应特性方面: 当体系暴露于高温环境时(超过凝胶到溶胶的临界相转变温度), 超分子凝胶由凝胶态向流动性良好的液态转变, 高温诱导的能量输入促使体系内氢键网络发生破坏(图1(b)和(d)), 从而打破了PFPE油在凝胶三维网络结构中的稳定束缚, 实现润滑油和凝胶因子的可控释放, 释放后的分子通过物理、化学作用吸附在摩擦副表面, 形成具有优异润滑、抗磨性能的边界润滑膜, 显著提升体系的润滑效能。当环境温度降至相变临界值以下时, 超分子凝胶发生由液态至固态的相转变过程, 凝胶因子通过分子间氢键作用自组装形成具有有序网络结构的类固体凝胶态(图1(b))。

在机械力响应特性方面: 在持续剪切力的作用下, 该超分子凝胶润滑材料呈现显著的流变响应特性, 发生从凝胶态向具备流动性的溶胶态的相转变过程, 此过程伴随着分子间作用力的动态解缔与重组; 当外部剪切力作用完全解除, 或体系所处环境的剪切速率降至临界阈值以下时, 该体系将通过非共价作用力的动态重组, 自发恢复至具有类固体力学特性的凝胶态(如图1(c)和(d))。

基于其优异的自适应性特性, 超分子凝胶润滑材料展现出与零部件服役工况高度适配的润滑性能。在摩

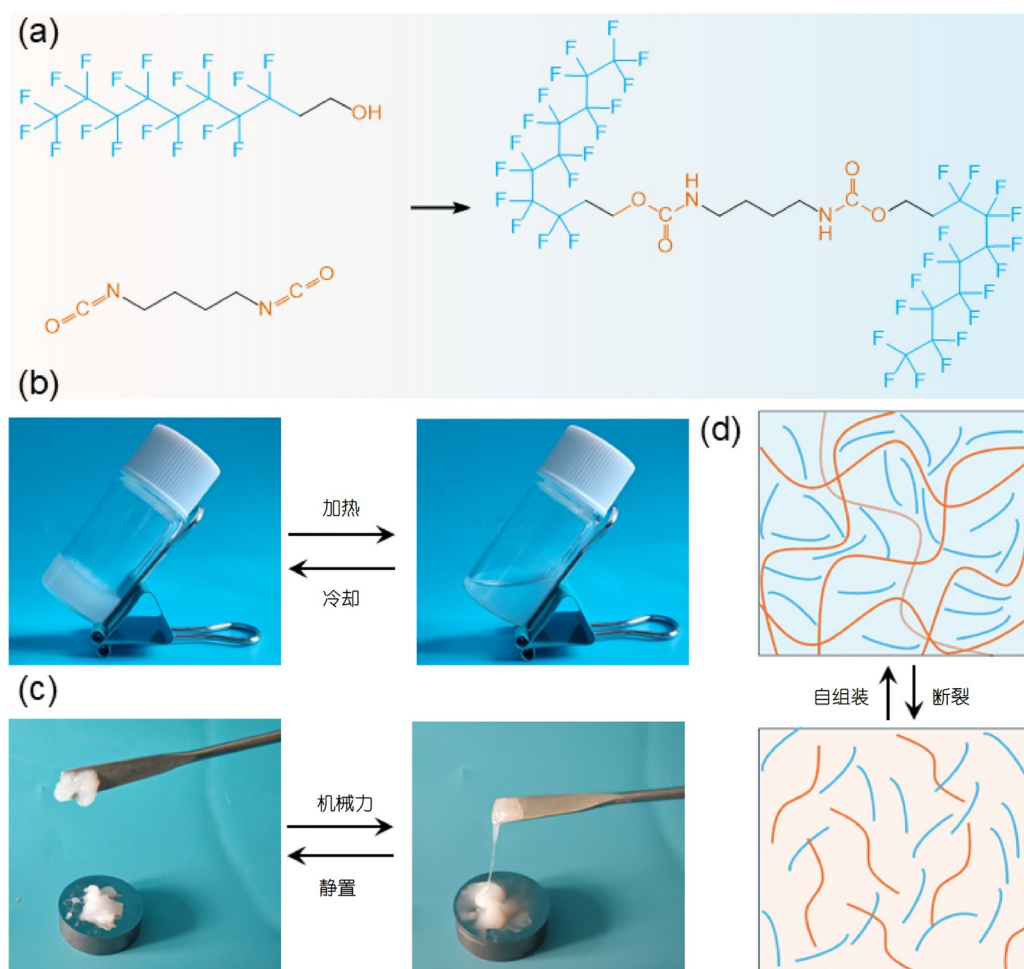


图 1 (网络版彩图) (a) 凝胶因子的合成制备过程及其分子结构示意图; (b) 全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料的温度响应性示意图; (c) 全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料的机械力响应性示意图; (d) 自组装有序网络结构的可逆转变机制示意图

Figure 1 (Color online) (a) Schematic of the preparation process and molecular structure of the gel factor; (b) temperature-responsive characterization of the spatial perfluoropolyether-type supramolecular gel lubricant; (c) mechanical-responsive characterization of the spatial perfluoropolyether-type supramolecular gel lubricant; (d) schematic illustration of the reversible transformation mechanism of the self-assembled three-dimensional network structure.

擦生热或剪切应力作用下, 该凝胶润滑材料通过触变响应机制实现凝胶-液相转变, 形成润滑膜以降低界面摩擦; 而未受剪切区域的凝胶基质仍保持类固态, 凭借其交联网络结构构建密封屏障, 有效抑制润滑介质的流失与挥发, 从而确保润滑系统的长期稳定运行。

超分子凝胶润滑材料所呈现的类固体状态, 及其通过自组装过程形成的有序网络结构, 在降低真空条件下PFPE油挥发损失方面展现出潜在应用价值。为验证全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料在空间环境中的稳定性, 本研究分别对PFPE油与超分子凝胶润滑材料开展了研究, 分析二者在真实空间环境和模拟空间环境

(含高真空、原子氧条件)下的挥发损失率。在真实空间环境暴露6个月之后, 其挥发损失量约为11%(图2)。为阐明空间环境各关键因素对超分子凝胶润滑材料稳定性的影响机制, 本研究设计了地面匹配验证实验。实验过程中, 采用与真实空间环境等效的原子氧通量(约 6×10^{15} atoms/(cm² s)), 对超分子凝胶润滑材料样品进行辐照处理, 时长设定为3 h。从实验数据分析可知, 在设定的原子氧通量相同的条件下, 样品的挥发损失率经测定约为2%。在相同原子氧通量的真实空间实验工况下, PFPE油的挥发损失率高达约8%。为系统剖析原子氧-真空复合环境对超分子凝胶润滑材料挥发损失

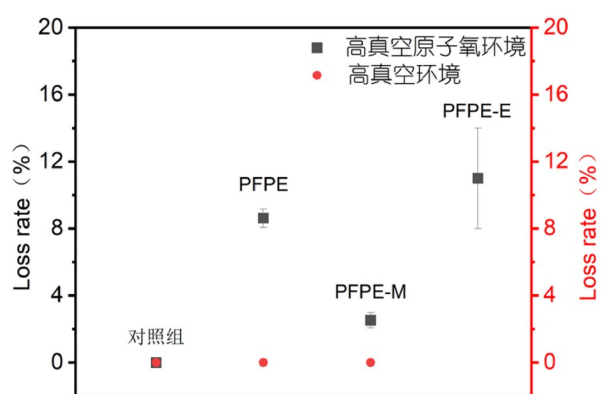


图2 (网络版彩图) PFPE润滑油、超分子凝胶润滑材料及样品托(对照组)在以下三种特定环境条件下的挥发损失量: 高真空环境; 高真空叠加原子氧辐照的复合环境(PFPE-M); 真实空间环境(PFPE-E)

Figure 2 (Color online) Volatility loss of PFPE lubricant, supramolecular gel lubricant and sample tray under three specific environmental conditions: high vacuum environment; combined environment of high vacuum and atomic oxygen irradiation (PFPE-M); real space environment (PFPE-E).

量的影响, 采用单因素变量控制法, 设定真空度为 10^{-2} Pa 的基准实验条件, 通过构建单一真空度环境对照组, 量化分析该因素对样品挥发损失量的作用规律, 进而明确其在真实复杂空间环境效应中的贡献度。研究结果表明, 真空度因素对PFPE润滑油及超分子凝胶润滑材料(PFPE-M)的挥发损失量几乎未产生影响, 该结果进一步证实, PFPE油在真空环境下具备优异的化学与物理稳定性, 其挥发特性受真空条件波动的干扰极小, 能够满足真空场景下对润滑材料低挥发、高稳定性的应用需求。同时, 为了更精确地分析客观因素对辐照下损失结果的影响, 设置了空样品托为对照组, 结果显示样品托在此过程中并未产生任何的质量损失, 这表明此环境下的挥发损失仅为润滑材料的挥发损失量。

上述研究结果从另一个方面进一步证实原子氧对PFPE油的稳定性存在显著影响。具体表现为, 在高通量原子氧辐照条件下, 原子氧与全氟聚醚润滑材料分子结构中的C-O键发生氧化反应, 生成 H_2O 和 CO_2 等气态产物。这一氧化过程致使全氟聚醚润滑材料的化学结构遭到破坏, 引发分子链断裂, 导致长链的PFPE油分解为易挥发的小分子氟化物, 进而导致润滑材料出现挥发性损耗现象^[18,19]。与PFPE油相比, 经地面模拟原子氧辐照处理后的超分子凝胶润滑材料挥发损失量呈现显著降低趋势, 降幅约为6%。该现象的产生机理

可归因于超分子凝胶润滑材料类固态的结构: 此结构能够有效阻碍原子氧对润滑材料本体的进一步侵蚀作用, 进而使其在挥发损失方面表现出更好的稳定性。

然而, 在真实的空间环境中, 存在高能粒子、高真空、极端温度、辐射、等离子体等多种复杂且苛刻环境因素的耦合作用, 超分子凝胶润滑材料的挥发损失量, 显著高于地面原子氧辐照实验中样品的挥发损失量。推测其原因如下: 在多空间环境因素耦合作用条件下超分子凝胶润滑材料可能同时受到多种损伤机制的协同影响, 这种作用会进一步引发材料自身结构或性能的改变。例如, 带电高能粒子在与材料原子相互作用时, 可能撞击原子的核外电子, 致使电子克服原子核对其的束缚脱离原有轨道, 进而诱发大量自由基的生成; 此类自由基可与原子氧发生协同作用, 该协同效应会显著加速材料的氧化反应进程, 最终导致超分子凝胶润滑材料在空间环境中的挥发速率大幅提升。

4 空间环境下超分子凝胶润滑材料结构变化

空间环境具有复杂性与动态演化特性, 其微重力、高真空、高能粒子辐射、原子氧侵蚀以及剧烈的高低温度循环等极端条件相互耦合。这些环境要素通过物理、化学及力学等多效应协同作用, 致使材料发生力学性能劣化、化学稳定性下降与微观结构重构, 进而显著影响材料在空间应用中的服役可靠性与预期寿命。在为期6个月的真实空间舱外暴露实验后, 对超分子凝胶润滑材料的外观特征进行观察发现, 其表面呈现出显著的颜色改变, 具体表现为由实验前的白色转变为褐色(如图3(a)所示)。该现象的形成机制可归因于: 空间环境中原子氧、高能粒子等活性物质与表层超分子凝胶润滑材料发生交互作用, 促使其体系内产生具有高化学活性的自由基; 这些自由基与环境中的氧气接触后, 会引发一系列氧化反应, 最终致使外观颜色发生改变。为深入剖析样品表面结构演变规律, 采用微观形貌表征技术对其表层材料进行研究, 测试结果如图3所示。根据表征数据可知, 样品表面呈现膜状物质沉积特征; 结合反应机理分析, 该膜状物质的形成过程可归因于原子氧辐照诱导的C-O键断裂及其后续重组反应。通过元素分析(图3(b1)~(c))可知, 该膜状物质的主要化学成分为C, F, O三种元素。这一分析结果进一步证实, 在空间环境中, 高能粒子、紫外线、原

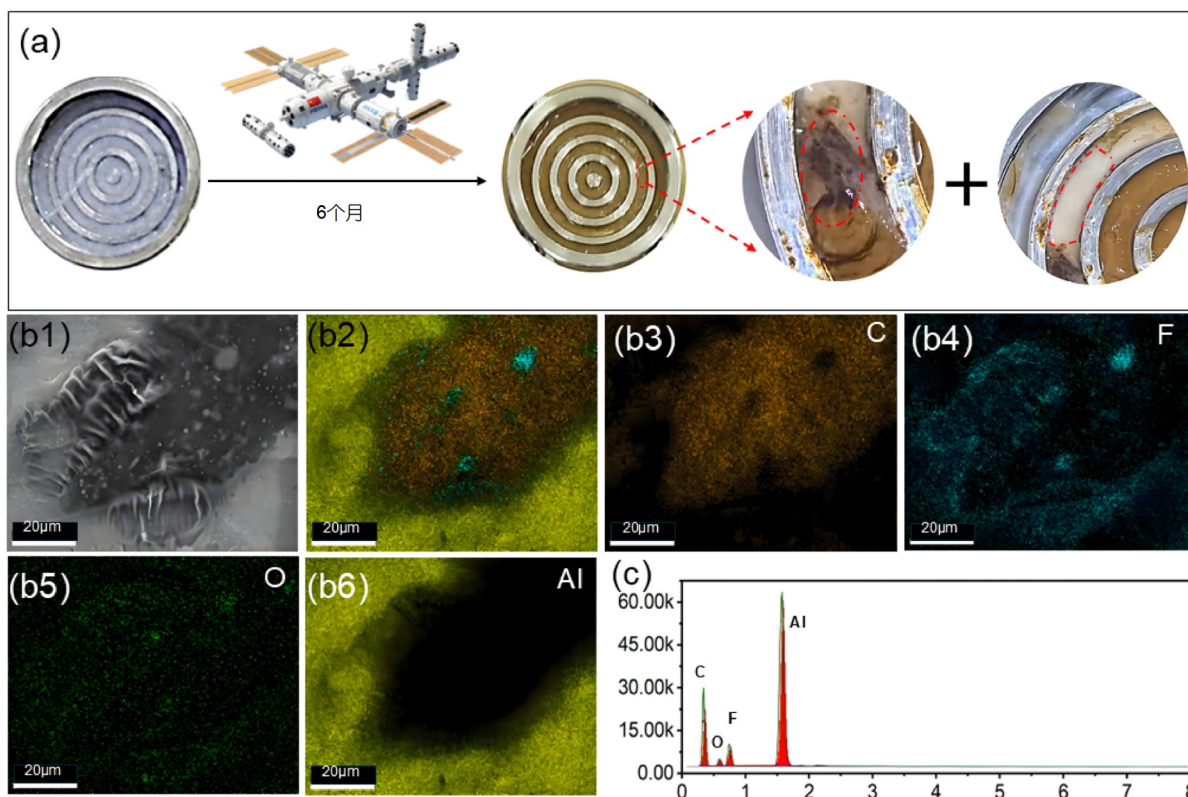


图 3 (网络版彩图) (a) 超分子凝胶空间舱外暴露前后的对比照片及表层和内部样品实照; (b1)~(b6) PFPE油地面等同空间原子氧辐照通量地面匹配实验结果; (c) 膜状结构元素分析能谱

Figure 3 (Color online) (a) Comparison photographs of the supramolecular gel before and after spatial exposure, along with actual images of the surface and interior samples; (b1)~(b6) results of ground-matching experiments for atomic oxygen irradiation flux equivalent to perfluoropolyether lubricant surfaces; (c) elemental analysis energy spectrum of the membrane-like structure.

子氧等因素可能诱导全氟聚醚超分子凝胶润滑材料发生重组反应。然而,位于表层以下的超分子凝胶润滑材料仍较好地保持白色。这一结果表明,鉴于超分子凝胶润滑材料的类固体特性,其能够有效抵御空间环境因素对内部结构的持续性侵蚀。

为进一步解析全氟聚醚型润滑材料在空间环境下的损伤机制,本研究利用地面模拟空间环境平台,分别对PFPE油(图4(a1)~(a3))与超分子凝胶润滑材料(图4(b1)和(b2))开展原子氧辐照实验。结果发现,当PFPE油与超分子凝胶润滑材料经过高通量的原子氧辐照后,其表面并未发生明显的色变,但是原子氧辐照后引起了PFPE油和超分子凝胶润滑材料的挥发损失(图2),并且PFPE油的挥发损失量远高于超分子凝胶润滑材料。产生这种现象的原因可能是强氧化性自由基原子氧攻击PFPE油中的醚键,形成不稳定的C-O-O-中间体,导致C-O键断裂,生成含氟自由基和含氧化合物,而新的自

由基会继续与原子氧反应,进一步引发主链断裂,形成更短的分子片段(图4(d))。这种“断裂-新自由基-再断裂”的链式反应将长链的PFPE油分解为低分子量具有较高挥发特性的含氟小分子,从而出现PFPE油挥发损失现象。而类固体的全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料在其自组装有序网络结构的保护下表现出较好的耐辐照稳定性。

此外,为深入探究空间站舱外暴露实验后下行的超分子凝胶润滑材料表面辐照变色机制,开展地面原子氧辐照匹配实验,并对辐照后样品开展系统研究。具体处理流程如下:取部分经原子氧辐照的样品转移至离心管密封保存,剩余样品则继续存放于C9Cr18高碳铬钢材质的样品托内,以便后续开展相关表征与分析实验。经静置48 h后,对样品托内PFPE油的观测结果显示:该润滑油在初始状态下呈现无色透明的物理性状,而在静置处理后,其颜色特征发生显著转变,具

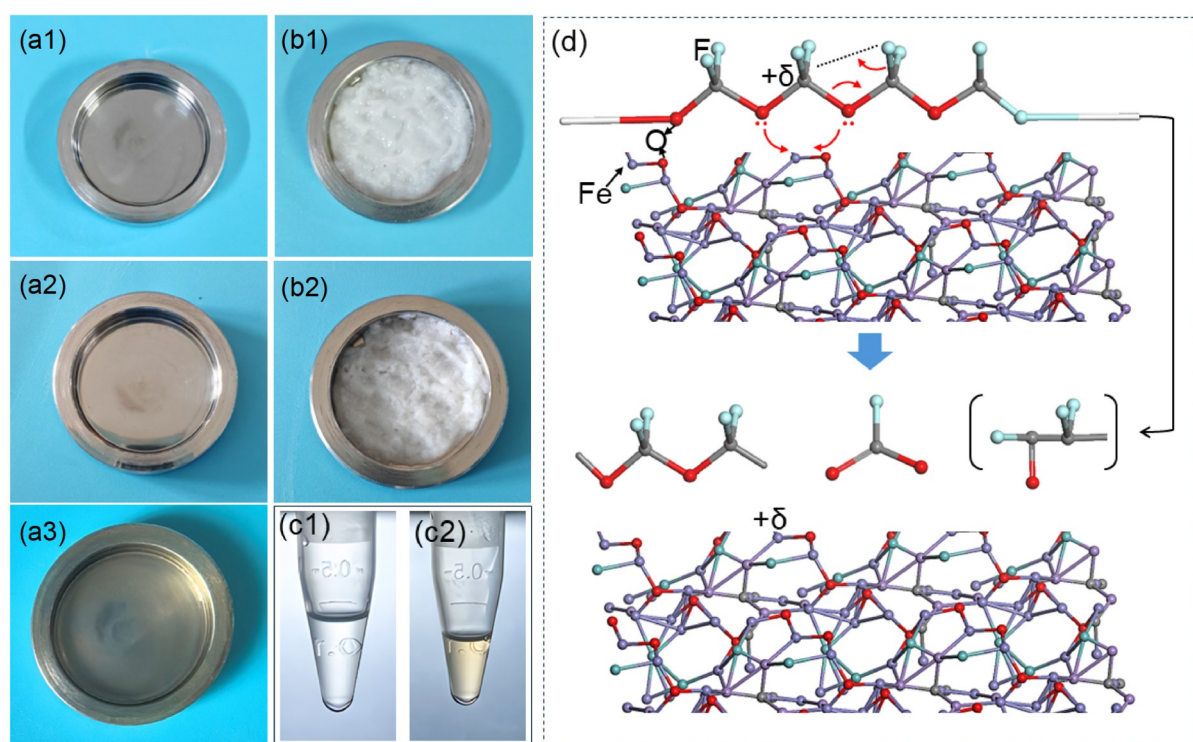


图 4 (网络版彩图)地面匹配原子氧辐照实验(原子氧通量 $\sim 6 \times 10^{15}$ atoms/(cm² s)). (a1), (a2) PFPE油辐照前后对比样; (a3) 辐照后PFPE油静置24 h后样品; (b1), (b2) 全氟聚醚超分子凝胶润滑材料辐照前后的样品; (c1) 辐照后的PFPE油立即取出后在离心管中静置48 h后的样品; (c2) 辐照后的PFPE油在9Cr18高碳铬钢样品托内静置48 h后的样品; (d) 全氟聚醚润滑材料的损伤机制

Figure 4 (Color online) Ground-level atomic oxygen irradiation experiment (atomic oxygen flux $\sim 6 \times 10^{15}$ atoms/(cm² s)). (a1), (a2) Pre- and post-irradiation samples of PFPE lubricant, respectively; (a3) PFPE sample after 24 h of standing post-irradiation; (b1), (b2) samples of perfluoropolyether supramolecular gel lubricant before and after irradiation; (c1) irradiated PFPE oil sample immediately removed and left to stand in a centrifuge tube for 48 h; (c2) irradiated PFPE oil sample left to stand for 48 h in a 9Cr18 high-carbon chromium steel sample holder; (d) damage mechanism of perfluoropolyether lubricants.

体表现为向黄色调的明显偏移。该色变现象在观测过程中呈现出良好的辨识度与可重复性(图4(a3)和(c2))。相比之下,经取出操作后,离心管内样品的色泽未出现任何改变。产生这种差异现象的原因可能是在原子氧的轰击下,样品托的表面也发生了氧化导致PFPE油部分C-O键发生断裂,形成不稳定的自由基和含氟氧化物(图4(d))^[20]。其中,含氟氧化物在氧化铁的作用下形成含氟烯烃或含氟烷基化合物,当多个C=C双键形成共轭双键时,低分子量的含氟烯烃挥发,大分子量的烯烃则会残留于PFPE油中,导致PFPE油发黄;此外,PFPE油有可能残存氟化不完全的现象,残留的甲基(-CH₃)或亚甲基(-CH₂-)被氧化为醛基(-CHO)或羧基(-COOH),当多个醛基或羧基与双键共轭时会显色,当深度氧化时有可能形成共轭双键甚至芳香环,从而表现出更强的色变^[4,21]。与之相比,全氟聚醚型的超分子

凝胶润滑材料则表现出较稳定的性能,放置48 h内未发生显著的色变,这可归因于超分子凝胶自组装的有序网络结构对PFPE油发挥包埋保护的作用,阻止了原子氧对PFPE油的进一步侵蚀。因此,长期暴露于空间环境的超分子凝胶润滑材料的表面显现为黄色可能归因于长期空间高真空、微重力、高能粒子、原子氧等引发了其表面氧化作用。

5 空间用全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料的分子结构表征

为进一步深入剖析超分子凝胶润滑材料在原子氧辐照及下行样品分子结构的变化规律,本研究采用傅里叶红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)对其分子结构特征展开系统分析。由图5

所示的测试结果可知, 超分子凝胶(PFPE-Y, PFPE-M, PFPE-E)的红外吸收曲线在 3300 cm^{-1} 波数处出现N-H伸缩振动特征峰, 同时分别在 1690 与 1500 cm^{-1} 波数附近出现酰胺键I带(amide I band)和酰胺键II带(amide II band)的特征吸收峰. 该现象表明, 全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料在经受原子氧辐照, 或暴露于包含空间带电粒子、高能量紫外辐射等在内的空间苛刻环境因素后, 其原始凝胶网络结构仍可得到有效保持. 然而, 通过对比各特征峰吸收强度比值发现, 经原子氧辐照及空间环境暴露后的样品, 其酰胺键与C-H键(如图5(b)所示)的相对比例均出现一定程度降低. 分析认为, 产生该现象的原因可能在于: 表面的凝胶因子与原子氧、空间带电粒子或高能量紫外辐射发生氧化反应, 生成 CO_2 与 H_2O 等挥发性产物; 此类产物的形成与逸散, 最终导致样品在原子氧辐照及高真空环境条件下产生部分挥发损失. 然而, 鉴于超分子凝胶润滑材料属于由PFPE油相互包裹形成的类固体结构, 仅表层微

量物质发生了性质变化; 而被大量具备优异抗氧化安定性的Z型全氟聚醚所包裹的分子, 其结构仍维持稳定状态. 因此, 超分子凝胶润滑材料仍保持了稳定的凝胶态表观结构.

为了进一步表征空间环境对超分子凝胶润滑材料的损伤机制, 采用X射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)分别对全氟聚醚凝胶原样(PFPE-Y)及下行样品表面及内部进行采样分析(图6). 首先, 从精细谱图可以看出(图6(a)), 三种样品谱峰中的C, F, O的位置、强度比、峰形等数据基本一致, 特征峰位置并无区别. 这表明了超分子凝胶结构中以C, F, O为核心的主链结构未发生显著变化, 因此未检测出C, F, O三种元素对应的特征峰在峰形与峰位上存在明显差异(图6(b)~(d)). 此结果进一步表明, 表层分子经氧化反应生成 CO_2 与 H_2O 后, 已分散于空间环境中. 基于这一反应过程与物质去向, XPS测试未检测到元素化学态的变化, 该结果与上述反应机理具有一致性.

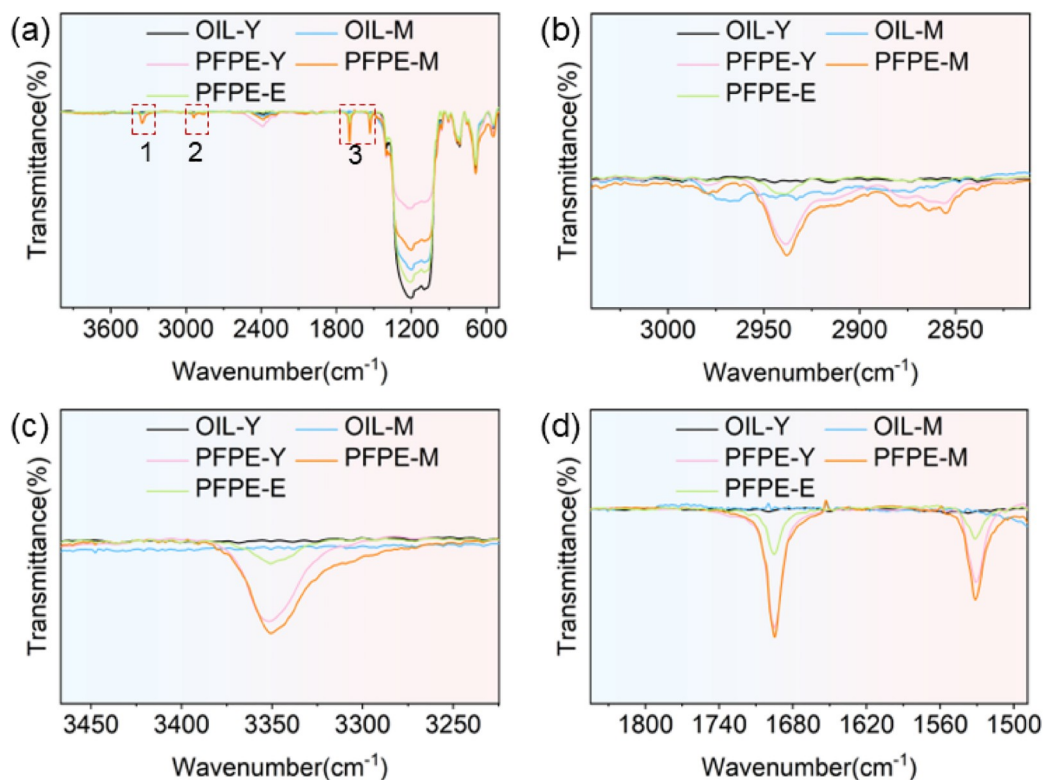


图5 (网络版彩图) (a) 空间用全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料原始样品(PFPE-Y)、原子氧辐照后样品(PFPE-M)及下行样品(PFPE-E)的傅里叶红外光谱图; (b) (a)中2区局部放大图; (c) (a)中1区局部放大图; (d) (a)中3区局部放大图

Figure 5 (Color online) (a) Fourier transform infrared spectra of the original sample (PFPE-Y), the sample irradiated with atomic oxygen (PFPE-M), and the sample exposed to space (PFPE-E) of the perfluoropolyether-type supramolecular gel lubricant; (b) a close-up of region 2 in (a); (c) a close-up of region 1 in (a); (d) a close-up of region 3 in (a).

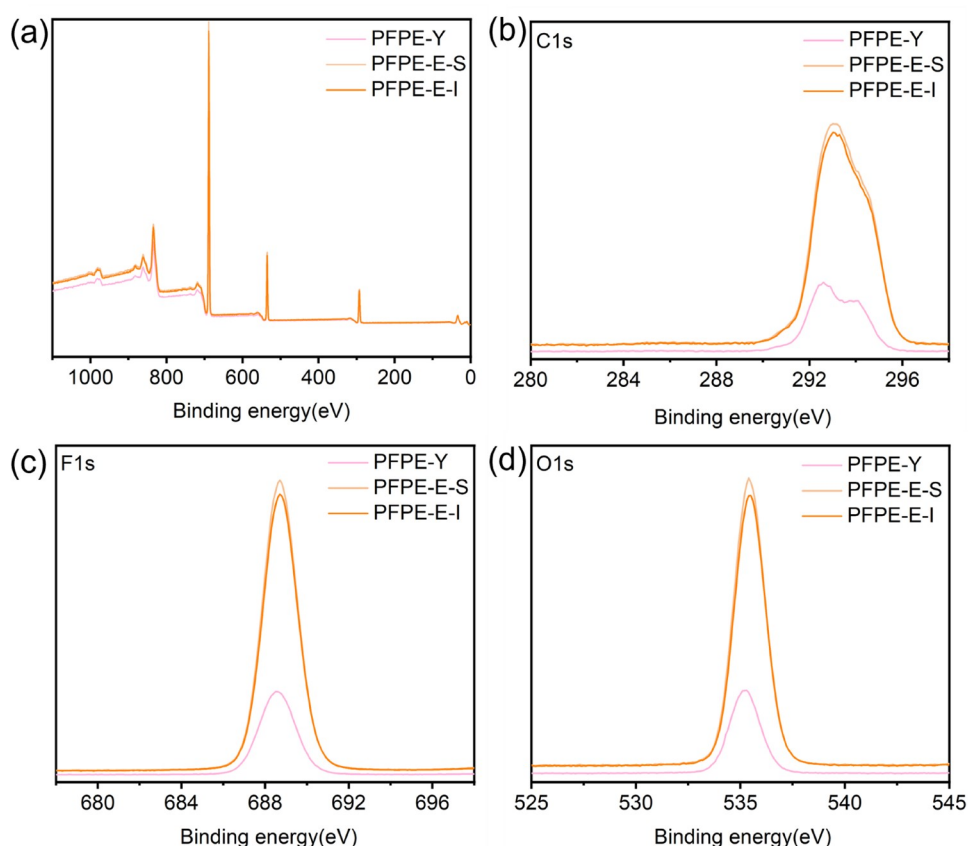


图6 (网络版彩图)超分子凝胶润滑材料原样(PFPE-Y)、下行样品表面(PFPE-E-S)及暴露后样品内部(PFPE-E-I)的元素分析谱图. (a) XPS精细谱; (b) C元素谱图; (c) F元素谱图; (d) O元素谱图

Figure 6 (Color online) Elemental analysis spectra of the pristine spatial perfluoropolyether-based supramolecular gel lubricant (PFPE-Y), the surface of the spatially exposed sample (PFPE-E-S), and the interior of the exposed sample (PFPE-E-I). (a) XPS fine spectrum; (b) C1s; (c) F1s; (d) O1s.

6 热稳定性分析

良好的热稳定性是全氟聚醚润滑材料在空间应用中的关键性能指标之一. 为系统评估其热稳定特性, 本研究采用同步热分析法(STA 449 F3), 对PFPE油、PFPE-Y、PFPE-M及PFPE-E四类样品开展热稳定性测试分析. 从图7热重分析(thermo gravimetric analysis, TGA)试验获得的数据可知, PFPE油与其他三种超分子凝胶润滑材料样品的热稳定性能呈现出显著的差异性特征. 通过对热重曲线图的系统解析可知, 所有待测样品的热分解过程均表现出三个典型的阶段. 具体分析如下.

第一阶段为热稳定阶段. 结合图7(a)中的热重(thermogravimetry, TG)曲线与图7(b)中的微分热重(derivative thermogravimetry, DTG)曲线数据可知, PFPE

油的起始分解温度约为290°C; 而PFPE-Y、PFPE-M及PFPE-E的起始热分解温度均稳定在310°C左右, 这表明了超分子凝胶润滑材料在50°C~310°C的温度区间内, 始终保持良好的热稳定性. 该特性为其在空间极端温度环境中的推广与应用, 提供了关键的性能支撑.

第二阶段为样品热分解的核心反应阶段, 其过程可通过TG曲线的质量变化趋势与DTG曲线的特征峰进行协同表征. 由图7(b)所示的DTG曲线可知, PFPE油的热分解温度区间为290°C~500°C, 其最大失重速率为29%/min; 当温度升至500°C左右时, 该润滑油的失重率达到100%, 表明其已完全分解. 与之相比, 全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料的最大失重速率均有所降低: 其中, 超分子凝胶润滑材料原样的最大失重速率为19%/min, 完全分解温度约为530°C; PFPE-M和PFPE-E两种样品的最大失重速率降至11%/min, 且完全热分

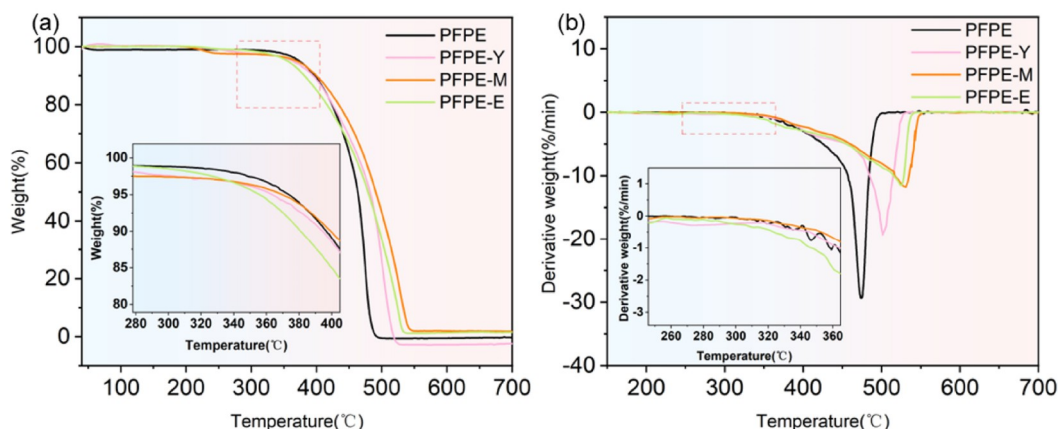


图 7 (网络版彩图) PFPE油、PFPE-Y、PFPE-M及PFPE-E超分子凝胶润滑材料的热稳定性分析. (a) 样品TG数据曲线; (b) 一阶DTG数据曲线

Figure 7 (Color online) Thermal stability analysis of space-used PFPE lubricant, pristine supramolecular gel lubricant (PFPE-Y), ground-matched irradiated supramolecular gel lubricant (PFPE-M), and space-exposed supramolecular gel lubricant (PFPE-E). (a) TG analysis curves of the samples; (b) first DTG analysis curves.

解温度进一步提升至550°C左右. 通过对比分析可见, 超分子凝胶润滑材料的自组装三维网络结构, 不仅显著提高了PFPE基础油的起始分解温度, 还有效降低了其分解速率. 该特性可避免在摩擦过程中因温度骤然升高导致PFPE完全分解, 为其在高温苛刻工况下的应用提供了性能保障.

第三阶段对应的过程为样品的完全分解阶段. 结合图7(a)和(b)可以看出, PFPE和超分子凝胶样品在此阶段时的失重率均达到了100%. 在高温工况下, 该材料展现出完全热解且无固相残余的优异特性. 从环境行为学角度分析, 当材料处于极端高温环境时, 即使因热应力或其他环境因素导致样品损耗, 其热分解产物因不存在残留物质, 从源头上也阻断了损耗过程中次生污染物的产生与扩散路径, 这一特性显著降低了二次污染风险.

7 流变学性能分析

在超分子凝胶润滑材料体系中, 其多级微介观结构对宏观流变行为具有直接的决定性作用. 其中, 储能模量(G')作为材料黏弹性特性的重要参数, 可定量表征凝胶因子通过氢键自组装形成的有序网络结构的弹性响应能力; 而损耗模量(G'')则主要用于描述超分子凝胶润滑材料在动态力学加载过程中, 由黏性成分引起的能量耗散特性. 为深入解析空间环境因素对全

氟聚醚型超分子凝胶润滑材料性能的作用机理, 采用Discovery HR 20微流变仪对PFPE-Y, PFPE-M及PFPE-E三种样品开展了系统的流变学性能表征. 流变学性能数据表明, PFPE-M和PFPE-E表现出一致的性能演变趋势: 相较于PFPE-Y样品, PFPE-M和PFPE-E两种样品的黏性模量(G'')与弹性模量(G')均呈现下降趋势(见图8). 前述结果已证实超分子凝胶润滑材料的宏观凝胶态并未发生变化, 但是原子氧辐照后会引致部分凝胶因子发生降解, 导致三维网络结构中氢键的数量降低, 从而降低了超分子凝胶润滑材料的黏弹性. 而真实空间环境中由于高能粒子、高低温交变、微重力等多环境因素耦合作用, 导致了超分子凝胶润滑材料中的损失量增加, 进而表现出低的黏弹性.

从图8(a)动态振荡测试曲线可知, 在室温(25°C)和恒定角频率(6.28 rad/s)条件下PFPE-Y, PFPE-M及下行PFPE-E的储能模量(G')始终保持大于损耗模量(G'')的趋势, 且在临界相转变处, 二者出现相交现象, 完全符合Winter-Chambon准则. 这一结果表明, 真实空间环境因素耦合作用条件下并未改变超分子凝胶润滑材料的“凝胶态”宏观特性. 与此同时, 与PFPE-Y样品相比较, PFPE-M及PFPE-E两种样品屈服点同样呈现出轻微的下降态势. 该现象进一步证实, 在原子氧辐照与空间舱外暴露复合环境作用下, 超分子凝胶润滑材料体系中的部分凝胶因子发生氧化降解反应, 此降解过程直接导致其有序网络结构产生局部断裂现象, 最终造成凝

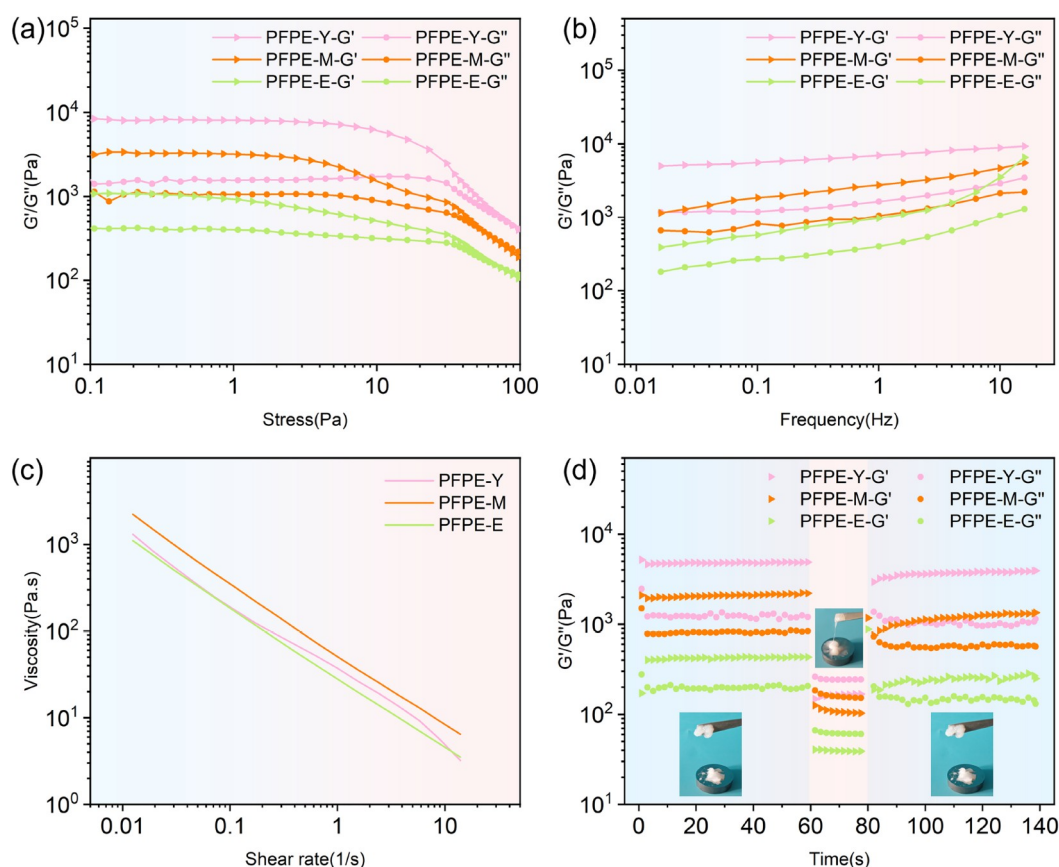


图8 (网络版彩图) PFPE-Y, PFPE-M及PFPE-E的流变学性能表征. (a) 室温(25°C)条件下振幅扫描获取的储能模量和耗损模量的随剪切应力的变化曲线; (b) 室温条件下频率扫描获取的储能模量和耗损模量随剪切频率的变化曲线; (c) 样品的黏度随剪切速率的变化曲线; (d) 样品的储能模量和耗损模量随高-低变剪切强度的变化曲线

Figure 8 (Color online) Rheological characterization of initial samples (PFPE-Y), atomized oxygen-irradiated samples (PFPE-M), and space-exposed samples (PFPE-E) of perfluoropolyether-based supramolecular gel lubricants. (a) Shear stress versus storage modulus and loss modulus curves obtained from amplitude sweep measurements at room temperature (25°C); (b) curves of storage modulus and loss modulus versus shear frequency obtained from frequency scans at room temperature; (c) curve of viscosity versus shear rate for the samples; (d) curves of storage modulus and loss modulus versus high-low alternating shear intensity for the samples.

胶网络交联程度的显著降低. 值得注意的是, 在长达6个月的空间环境暴露后, 超分子凝胶润滑材料的流变学数据表明其仍保持良好的黏弹性能和稳定的超分子凝胶结构. 这一结果充分说明, 原子氧及空间环境因素对超分子凝胶润滑材料的氧化作用机制应为一个缓慢的动态过程, 其短期影响不足以破坏凝胶的稳定性.

在室温环境与恒定剪切力条件下, 对PFPE-Y, PFPE-M及PFPE-E三种样品进行动态流变性能表征, 剪切速率范围为0.015~15 Hz. 实验结果表明, 三种样品的储能模量(G')在整个测试频率区间内均持续大于损耗模量(G''), 证明该超分子凝胶润滑材料在不同剪切作用下保持良好的稳定性, 见图8(b).

相较于润滑脂, 超分子凝胶润滑材料的优势体现在其良好的剪切稀化性能. 由图8(c)可知, 随着剪切速率的增大, 超分子凝胶润滑材料的黏度呈现逐步降低的变化趋势, 该剪切稀化行为可确保其在摩擦作用过程中快速响应, 迅速转变为低黏性流体状态, 从而有效减少剪切过程中的额外能源损耗, 提升润滑系统的能量利用效率.

超分子凝胶润滑材料因其优异的自修复性能, 已在相关领域获得广泛关注. 流变学性能表征作为关键分析手段, 可进一步对超分子凝胶润滑材料的机械响应性展开定性与定量研究. 通过变剪切强度测试, 对其储能模量与损耗模量进行了的定量分析(图8(d)). 结

果显示当剪切强度处于较低水平(0.5 Pa)时, PFPE-Y、PFPE-M及PFPE-E三种样品的储能模量均大于耗损模量, 表现出稳定的凝胶态特征. 当剪切强度提升至55 Pa时, 在高剪切力的作用下, 超分子凝胶的有序网络结构被破坏, 导致凝胶的模量发生反转, 储能模量小于耗损模量, 呈现出具有流动性的溶胶态. 而当剪切强度再次降至0.5 Pa时, 被破坏的分子间作用力自发地重组, 再次形成稳定的有序网络结构, 从而表现为超分子凝胶的模量恢复至储能模量大于耗损模量的初始状态, 即重新呈现稳定凝胶态. 这表明超分子凝胶润滑材料保持了固有的蠕变恢复特性, 具有较好的机械响应性, 这使其在润滑过程中可以更好地发挥润滑、抗磨作用. 而未被剪切或停止机械运转时溶胶再次恢复为类固体的凝胶态, 对润滑油发挥自约束性能, 可发挥密封的作用.

综上所述, 超分子凝胶流变学性能的微观演变, 本质上是空间环境因素及原子氧辐照诱导微观结构重构的结果. 值得强调的是, 超分子凝胶润滑材料在宏观尺度下的流变学特征未呈现显著性变化, 这一实验结果充分证明了其具有稳定机械性能.

8 摩擦学性能表征

为验证超分子凝胶润滑材料空间应用的可行性, 采用真空摩擦试验机, 对地面模拟空间环境原子氧辐照处理的样品与空间站舱外暴露样品的摩擦学性能, 开展了系统性的评价实验. 实验测试条件设定如下: 载荷为5 N, 振动频率为5 Hz, 振幅为5 mm, 周期为30 min, 真空环境真空度控制在 10^{-3} Pa以下. 首先, 对PFPE润滑油在辐照处理前后的摩擦系数变化情况进行对比分析. 结果表明, PFPE在辐照前后的摩擦系数未出现显著波动, 整体保持稳定状态, 其平均摩擦系数约为0.02(图9). 实验结果表明, 经原子氧辐照处理后, PFPE油的减摩性能未出现显著降低, 其有效功能组分仍可正常发挥润滑作用, 整体表现出稳定的摩擦学性能. 同样, 从图9可以看出, PFPE-M和PFPE-E两种样品摩擦系数始终稳定维持在0.03左右, 说明其具有优异的润滑性能. 此现象可归因于PFPE油固有的优异摩擦学性能, 同时超分子凝胶独特的自组装微观结构在抵御空间环境因素侵蚀、维持润滑性能稳定过程中发挥了关键作用.

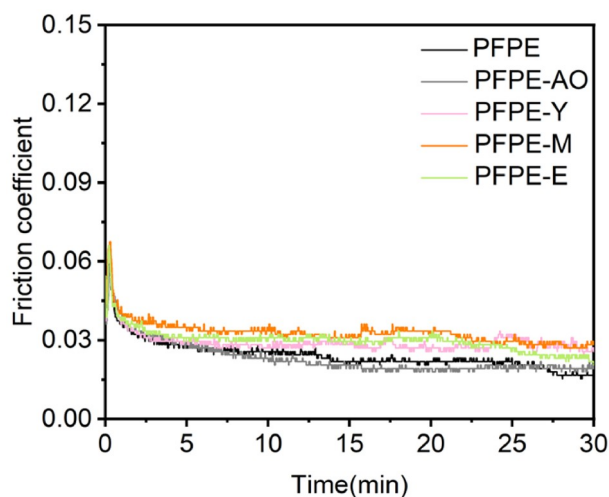


图9 (网络版彩图) PFPE油辐照前后(PFPE和PFPE-AO)及PFPE-Y、PFPE-M、PFPE-E在地面真空摩擦试验机中的摩擦系数变化曲线(载荷: 5 N, 频率: 5 Hz, 振幅: 5 mm, 真空度: 10^{-3} ~ 10^{-4} Pa)

Figure 9 (Color online) Friction coefficient variation curves of perfluoropolyether lubricants before and after irradiation (PFPE and PFPE-AO), as well as perfluoropolyether-based supramolecular gel lubricant samples: pristine (PFPE-Y), after atomic oxygen irradiation (PFPE-M), and after space exposure (PFPE-E), measured on a ground-based vacuum friction tester (load: 5 N, frequency: 5 Hz, amplitude: 5 mm, vacuum level: 10^{-3} ~ 10^{-4} Pa).

此外, 为进一步明确空间环境效应因素对超分子凝胶润滑材料抗磨性能的影响规律, 分别采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和光接触三维轮廓仪分析了上述摩擦环境下在摩擦副表面产生的损伤. 从表面磨损形貌图10(a1)~(a5)和三维形貌图10(b1)~(b5)可以看出, PFPE油原样、原子氧辐照后PFPE油样品、PFPE-Y、PFPE-M、PFPE-E作为润滑材料时, 在摩擦副表面产生的磨痕的宽度相差无几, 并且表面没有明显的磨损剥落或较深的犁沟. 并且从磨痕横切面可以定量地看出, 磨痕的宽度均在150 μm 左右, 磨痕的平均深度也在150 μm 左右. 基于上述实验结果可得出结论: 在空间多因素耦合作用影响下, 超分子凝胶润滑材料的抗磨性能未受到影响. 基于对实验数据的深入分析, 可推断该现象的产生机理为: 空间站舱外暴露实验后的全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料, 能够在摩擦副表面构建起稳定的摩擦膜, 其能够有效阻隔摩擦副间的直接接触, 显著降低了界面摩擦系数, 进而实现优异的润滑防护性能. 本研究结果为满足空间机械部件高可靠性、长寿命运行需求提供了

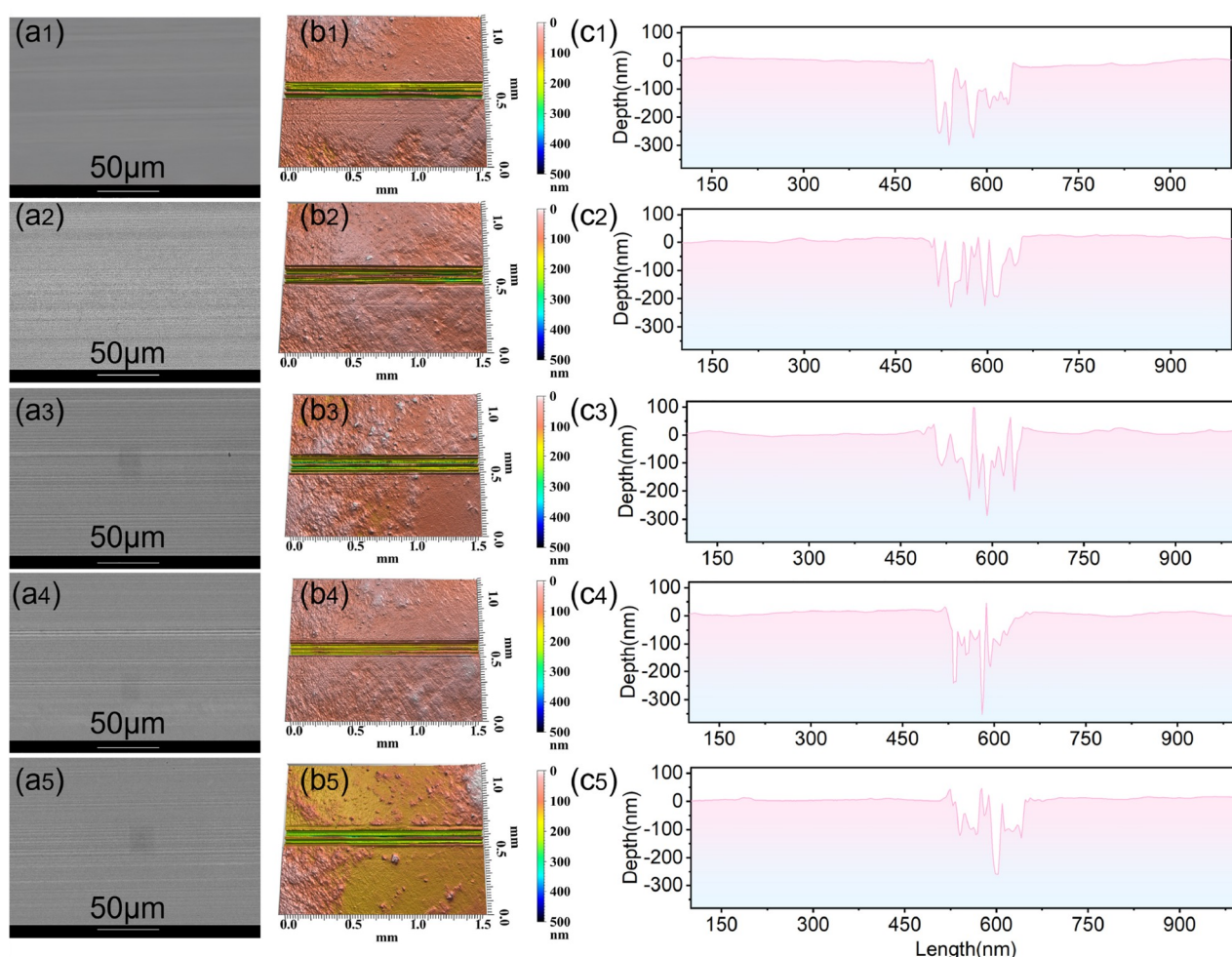


图 10 (网络版彩图) (a1)~(a5) PFPE油原样、PFPE油原子氧辐照后样品、PFPE-Y、PFPE-M、PFPE-E作为润滑材料时在摩擦副表面产生的磨损的扫描电子显微镜图; (b1)~(b5) 以上五种样品的三维轮廓图; (c1)~(c5) 与(b1)~(b5)对应的磨损的横截面图
Figure 10 (Color online) (a1)~(a5) Scanning electron micrographs of the following samples: pristine perfluoropolyether lubricant, perfluoropolyether oil irradiated with atomic oxygen, pristine supramolecular gel lubricant, supramolecular gel lubricant irradiated with atomic oxygen, and wear produced on the friction pair surface when the supramolecular gel lubricant was used as a lubricant after space exposure; (b1)~(b5) three-dimensional topography maps of the five samples, respectively; (c1)~(c5) cross-sectional views of the wear corresponding to (b1)~(b5), respectively.

新的材料和技术解决方案, 对推动相关领域工程应用的技术革新具有重要的理论指导意义与实践参考价值。

9 润滑机制

从摩擦学理论层面分析, 性能优异的润滑材料需在摩擦过程中, 在摩擦副表面通过界面吸附或摩擦化学反应形成摩擦保护膜, 方能发挥其卓越的减摩抗磨效能, 实现机械的长效稳定运行。基于上述摩擦学性能测试数据的系统分析, 全氟聚醚型超分子凝胶润滑

材料在经历空间站舱外暴露环境后, 其摩擦学性能指标仍保持在稳定区间, 未出现显著衰减或失效现象, 充分验证了该类材料在真实空间环境下具有优异摩擦学性能。为了进一步分析空间站舱外暴露实验后超分子凝胶润滑材料的润滑机理, 采用XPS对磨斑表面的元素化学态进行表征。从XPS精细谱图(图11(a))可以看出磨斑表面的主要组成元素分别有Fe, F, O, N, C等多种元素。为进一步精准剖析各元素的化学组成特征, 需对其化学态展开更为深入的系统性分析。结果显示, 285.0 eV为凝胶因子结构中的亚甲基($-\text{CH}_2-$)。通常,

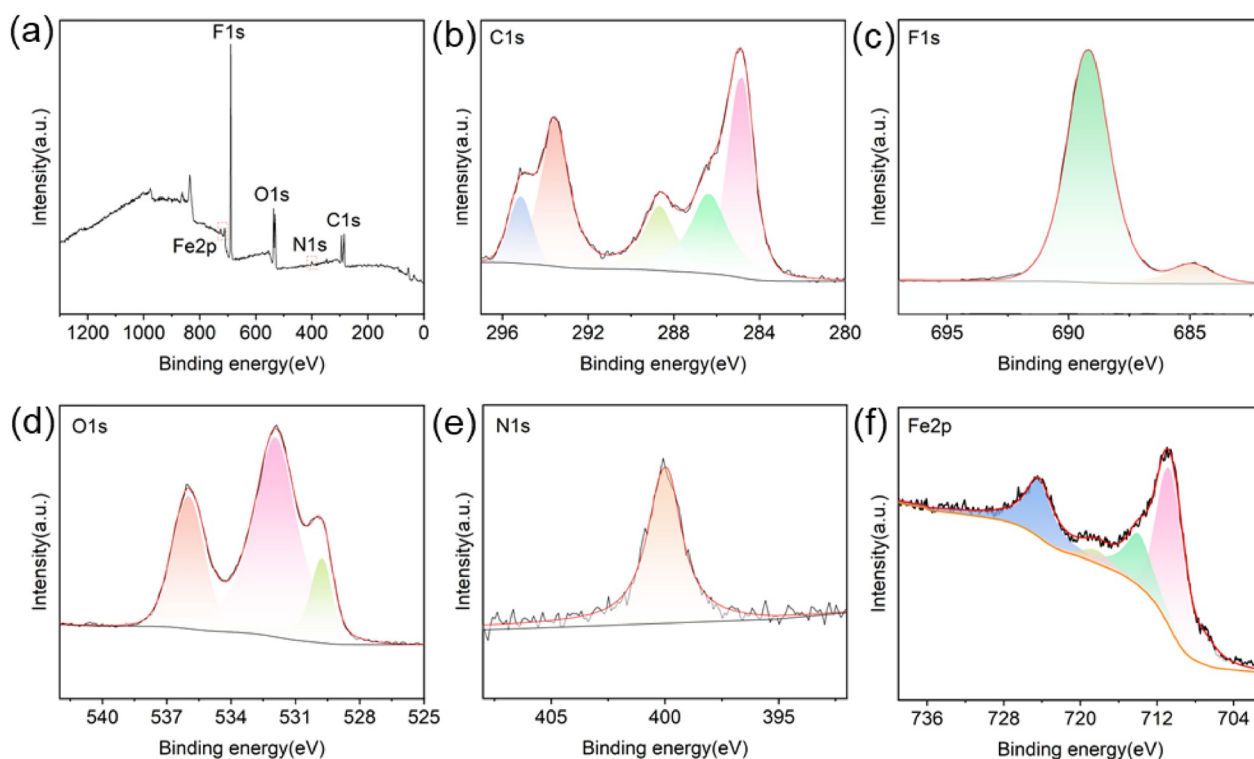


图 11 (网络版彩图)空间辐照后样品润滑机理表征. (a) XPS精细谱图; (b)~(f) C1s, F1s, O1s, N1s和Fe2p元素谱图

Figure 11 (Color online) Characterization of lubrication mechanism in samples after space irradiation. (a) XPS fine spectrum; (b)~(f) elemental spectra for C1s, F1s, O1s, N1s, and Fe2p, respectively.

$-\text{CF}_2$ 和 $-\text{CF}_3$ 的C1s结合能分别在292.0和293.4 eV, 而摩擦副表面的含氟C1s峰均向高结合能发生位移, $-\text{CF}_3$ 的结合能为295.1 eV, 这表明C元素中的一个氢原子被氧原子所替代, 引起了C1s电子发生 (1.5 ± 0.2) eV的化学位移, 表明了 $\text{CF}_3-\text{O}-$ 基团的存在; 同理, 当 $-\text{CF}_2-$ 中有两个氢原子被氧原子取代时将会引起 (3.0 ± 0.2) eV的化学位移, 表明了 $-\text{O}-\text{CF}_2-\text{O}-$ 片段的存在. 因此, C1s谱图中的295.1 eV可归于PFPE油中的 $\text{CF}_3-\text{O}-$ 和 $-\text{O}-\text{CF}_2-\text{O}-$ 的分子片段. 而位于293.6 eV的结合能可归于凝胶因子结构中的 $-\text{CF}_3$; 292.0 eV的结合能可归于凝胶因子结构中的 $-\text{CH}_2\text{CF}_2\text{CF}_2-$ 结构; 而288.9 eV的结合能源于凝胶因子结构中的氨基甲酸酯 $(-\text{O}-\text{C}(\text{O})-\text{NH}-)$, 其结合能发生了向低位转移的现象, 这可能是由于摩擦副表面的金属元素导致其产生了电子偏移; 286.4 eV附近的结合能再一次证明了 $-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$ 分子碎片的存在. 由此表明, 全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料在剪切力的作用下转移至摩擦副表面形成了摩擦膜. 而氟元素能谱显示有689.1和684.9 eV两个

特征峰(图11(c)). 其中, 较高含量的689.1 eV的F1s源于PFPE油和凝胶因子; 而685.0 eV的特征峰则表明了 FeF_2 的存在, 这表明在摩擦过程中可能发生了摩擦化学反应, 形成了化学反应膜. 通过表面O元素分析(图11(d))可知, 位于531.9 eV附近的结合能, 证明了摩擦副表面存在 $-\text{C}(\text{O})\text{N}-$ 结构^[22]; 而535.9 eV附近的结合能可能源于含氟氧化物, 如PFPE油; 进一步表明了摩擦副表面PFPE油和凝胶因子的存在. 此外, 529.7 eV结合能为Fe的氧化物, 可能是发生了化学反应. 而N1s单一元素谱图的结合能也进一步证明了凝胶因子参与了摩擦膜的形成(图11(e)). 而Fe元素分析谱图可以看出, PFPE油和凝胶因子在摩擦副表面可能发生了化学反应, 生成了铁的氧化物和氟化物, 如71.07 eV结合能所对应的 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 , 724.3 eV结合能所对应的 FeOOH , 713.9 eV所对应的 FeFx . 而718.2和706.95 eV则分别为Fe的2p_{3/2}和2p_{1/2}^[23-25]. 综上所述, 全氟聚醚型超分子凝胶润滑材料在经过6个月的空间站舱外暴露实验后, 在摩擦副表面仍可形成

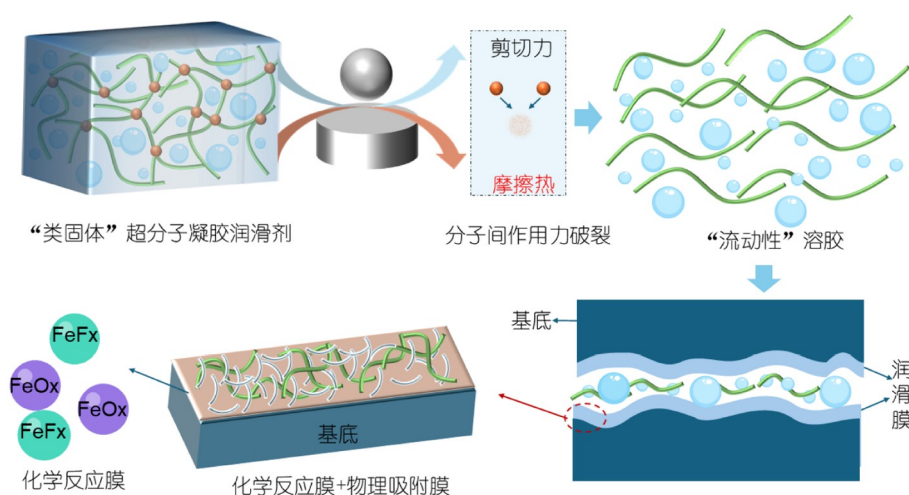


图 12 (网络版彩图)超分子凝胶润滑材料的润滑机理示意图

Figure 12 (Color online) Schematic diagram of the lubricant mechanism of supramolecular gel lubricants.

比较稳定的吸附膜和化学反应膜,从而表现出优异的减摩与抗磨性能。

综上所述,超分子凝胶润滑材料具备优异的热与机械力响应性能。在摩擦过程中,类固体形态的超分子凝胶润滑材料受摩擦热与机械力的协同作用,其分子间相互作用力发生破坏,在持续剪切力的驱动下,高黏度且无序的凝胶结构进一步转变为有序且具有流动特性的溶胶态结构。这一转变过程可使束缚于凝胶网络结构中的PFPE分子和凝胶因子释放出来,利用其极性头基在摩擦界面形成稳定的吸附膜,其结构中含有的活性F元素与金属基底进一步发生摩擦化学反应并形成一层主要由铁的氧化物与铁的氟化物构成的化学反应膜,为摩擦副提供稳定的润滑保护作用(图12)。摩擦副表面所形成的吸附膜和摩擦化学反应膜,能够有效阻隔摩擦副界面间的直接接触,进而阻止磨损现象的发生,使其呈现出优异的润滑、抗磨性能。

10 结论

针对空间机械装备高可靠、长寿命的润滑需求,

基于Z型PFPE润滑油体系,设计合成一种氟功能化凝胶因子,成功制备出新型类固体超分子凝胶润滑材料。该润滑材料展现出优异的热可逆响应特性与触变行为,在提供良好润滑剂作用的同时还可发挥密封的作用,为空间机械装备提供润滑与密封的协同解决方案。

结合空间站舱外暴露与地面模拟实验结果,明确了超分子凝胶润滑材料表面颜色变化的主要诱因,空间辐照作用致使凝胶因子与PFPE油形成的互包结构中,表层PFPE油分子发生氧化降解,进而引发凝胶润滑材料表层的变色。得益于超分子凝胶类固体结构的屏蔽效应,样品内部未出现明显的氧化或颜色变化,所以其内部结构保持完整。由于空间辐照、高能粒子、原子氧等导致小分子片段分解挥发,所以其热稳定性进一步提升;同时,其保持优异的流变学、蠕变恢复及润滑抗磨等性能。

以上研究结果表明,基于天地环境对比实验的系统性分析,成功揭示了超分子凝胶润滑材料在空间环境中的性能演变及损伤机理,本研究为其在空间机械运动部件中的应用提供了理论与技术支撑,为航天事业发展储备了新的润滑材料和技术。

致谢
谢忱。

此研究在中国科学院空间应用工程与技术中心钟红恩、张颖一等老师的通力协助下得以顺利实施,在此深表

参考文献

- 1 Han Y, Ying T, Yang J Q, et al. Review of technology developments for space radiation effect simulation (in Chinese). *Aerosp Shanghai*, 2025, 42: 39–52 [韩煜, 应涛, 杨剑群, 等. 空间辐射效应仿真技术发展综述. *上海航天*, 2025, 42: 39–52]
- 2 Meng J C, Qu S J, Hu Y Q, et al. Space environment and its effects during Martian sample-return mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2025, 12: 1–10 [孟佳程, 曲少杰, 呼延奇, 等. 火星取样返回全过程空间环境及效应. *深空探测学报*, 2025, 12: 1–10]
- 3 Zhao P, Zhang X, Fang Y, et al. On-orbit functional verification of combustion science experimental system in China space station. *Aerospace*, 2025, 12: 448
- 4 Gleirscher M, Wolfberger A, Schlögl S, et al. Accelerated thermo-catalytic degradation of perfluoropolyether (PFPE) lubricants for space applications. *Lubricants*, 2023, 11: 81
- 5 Sadeghi F, Trope E J, Schnell T J. Performance characteristics of perfluoroalkylpolyether synthetic lubricants. *Tribol Trans*, 1996, 39: 849–854
- 6 Zhu L, Dong J, Zeng Q. High temperature solid/liquid lubrication behaviours of DLC films. *Lubrication Sci*, 2021, 33: 229–245
- 7 Huo L X, Zhang J J, Guo F J, et al. Research progress on liquid lubricant for space mechanisms (in Chinese). *Mater Rep*, 2025, 39: 25030237 [霍丽霞, 张静静, 郭芳君, 等. 空间流体润滑材料研究进展. *材料导报*, 2025, 39: 25030237]
- 8 Liu Y, Zhao H, Li Q, et al. Research progress of perfluoropolyether polymers and functional composites. *Chem Ind Eng Prog*, 2023, 42: 321–335
- 9 Feng D P, Weng L J, Liu W M. Progress of tribology of perfluoropolyether oil (in Chinese). *Tribology*, 2005, 25: 597–602 [冯大鹏, 翁立军, 刘维民. 全氟聚醚润滑油的摩擦学研究进展. *摩擦学报*, 2005, 25: 597–602]
- 10 Liu J, Yan Z, Hao J, et al. Effect of irradiation dose on the structure and tribological performance of Ti:WS₂/PFPE composite lubricating system in atomic oxygen environment. *Tribol Trans*, 2023, 66: 1117–1127
- 11 Xie Y. Perfluoroalkylpolyethers lubricant (in Chinese). *Synth Lubricants*, 2005, 32: 38–42 [谢宇. 全氟聚醚润滑剂. *合成润滑材料*, 2005, 32: 38–42]
- 12 Xu R, Zhao X, Ma S, et al. Hydrogen bonding induced enhancement for constructing anisotropic sugarcane composite hydrogels. *J Appl Polym Sci*, 2021, 138: 51374
- 13 Xie A, Bai Y, Xu H, et al. Supramolecular gel lubricants with excellent lubricity and load-carrying performances act synergistically via two layers of tribofilm. *Adv Mater Inter*, 2022, 9: 2200683
- 14 Wang Y, Liu X, Wang R, et al. Elastohydrodynamic lubrication performance of PUMA-PSMA supramolecular polymer gel lubricant. *Tribol Int*, 2024, 191: 109148
- 15 Wang Y, Yu Q, Bai Y, et al. Self-constraint gel lubricants with high phase transition temperature. *ACS Sustain Chem Eng*, 2018, 6: 15801–15810
- 16 Yu Q, Wang X, Zhang C, et al. Resistance to space atomic oxygen radiation of MAC-based supramolecular gel lubricant containing POSS. *Tribol Int*, 2023, 177: 107838
- 17 Bai Y, Zhang C, Yu Q, et al. Supramolecular PFPE gel lubricant with anti-creep capability under irradiation conditions at high vacuum. *Chem Eng J*, 2021, 409: 128120
- 18 Zhang Y, Yuan H, Yan W, et al. The effects of atomic oxygen and ion irradiation degradation on multi-polymers: A combined ground-based exposure and ReaxFF-MD simulation. *Polym Degradation Stability*, 2022, 205: 110134
- 19 Li G, Wang J, Niu B, et al. Atomic oxygen-induced surface erosion behavior and mechanical degradation of polyether ether ketone via reactive molecular dynamics simulations. *J Phys Chem B*, 2023, 127: 5509–5520
- 20 Kunneparambil Sukumaran A, Rengifo S, Scott W, et al. Radiation-resistant Ti/BN coatings: Insights from 171 days exposure to space radiation and atomic oxygen in low orbit. *npj Mater Degrad*, 2025, 9: 93
- 21 Amanda W, Stubbs J T G. Preventing the “brown sugar” lubricant phenomenon: The relationship between PFPE chemical compositions and their susceptibility to lewis acid-catalyzed degradation. In: *Proceedings of the 46th Aerospace Mechanisms Symposium*. 2022. 211–222
- 22 Kehrer M, Duchoslav J, Hinterreiter A, et al. XPS investigation on the reactivity of surface imine groups with TFAA. *Plasma Processes Polym*, 2019, 16: e1800160
- 23 Elsener B, Atzei D, Krolkowski A, et al. Effect of phosphorus concentration on the electronic structure of nanocrystalline electrodeposited Ni–P alloys: an XPS and XAES investigation. *Surf Interface Anal*, 2008, 40: 919–926

- 24 Nascimento J P S, Oliveira A C, Fernandes F A N, et al. Surface sensitivity of mesoporous carbon-supported iron catalysts in the Fischer-Tropsch synthesis: An *in situ* XPS site evolution at distinct reaction conditions. *Energy Fuels*, 2025, 39: 15634–15647
- 25 Zhou X, Zhu D, Su Y, et al. Cryo-TEM study of high-performance iron difluoride cathode enabled by low temperature CVD carbon coating. *Adv Funct Mater*, 2024, 34: 2307131

The space environment effects and performance evolution of perfluoropolyether-based supramolecular gel lubricants

BAI YanYan¹, LYU HongYu², WANG Ke², FAN Lin³, LIU ChangQing³, CAI MeiRong^{1,3}, ZHOU Feng¹ & LIU WeiMin¹

¹ Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

² Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China

³ Shandong Laboratory of Yantai Advanced Materials and Green Manufacturing, Yantai 264000, China

In space exploration and development missions, lubrication technology is one of the key technologies ensuring the stable operation of spacecraft mechanical systems, extending equipment lifespan, and guaranteeing mission success. Among various space liquid lubricants, perfluoropolyether (PFPE) lubricants have become one of the most widely used lubricants in space applications due to their exceptional chemical and thermal stability. However, PFPE lubricants exhibit low surface tension, making them prone to creep and migration at mechanical interfaces, which compromises the lubrication reliability of space equipment. To address this issue, this paper designed and prepared a fluorine-functionalized gel factor for space-grade Z-type PFPE lubricants. This led to the successful development of a quasi-solid perfluoropolyether supramolecular gel lubricant material, intermediate between oils and greases. The gel factor self-assembles into an ordered network structure through intermolecular non-covalent interactions, effectively confining the PFPE oil. This supramolecular gel lubricant exhibits outstanding thermal reversibility and thixotropy: it transforms into a flowing sol state under high temperatures or high shear to perform lubrication functions, and reverts to a quasi-solid gel state under low temperatures or static/low shear conditions to fulfill sealing functions, meeting the dual requirements of lubrication and sealing for space equipment. To validate the material's performance evolution and damage mechanisms in real space environments, a six-month external exposure experiment was conducted on the space station's material exposure platform, supplemented by ground-based simulation experiments for comparison. Structural and performance analyses of returned samples, combined with ground-matched experiments, revealed the structural-performance evolution and damage mechanisms of the supramolecular gel lubricant under space environmental factors. Results indicate that despite surface oxidation of the returned supramolecular gel samples, their physicochemical properties remained largely unaffected. Thermal stability improved, while rheological properties—including viscoelasticity, shear thinning, and creep recovery—were well preserved. Crucially, compared to pre-exposure samples, friction coefficients and wear rates remained comparable, maintaining excellent lubrication performance. This research provides theoretical and technical support for the application of supramolecular gel lubricants in space mechanical moving components, offering new lubricant materials and technologies for the advancement of aerospace endeavors.

spatial exposure, perfluoropolyether lubricant, supramolecular gels, space environment effects, lubricant properties

doi: [10.1360/SST-2025-0287](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0287)