极端条件下的聚酰亚胺自润滑复合材料的 研究进展

段春俭^{1,2}, 邵明超^{1,2}, 李宋^{1,2}, 张新瑞¹, 王超¹, 王齐华¹, 王廷梅^{1*}

1. 固体润滑国家重点实验室; 中国科学院兰州化学物理研究所, 兰州 730000

2. 中国科学院大学, 北京 100049

*通讯作者, E-mail: tmwang@licp.cas.cn

收稿日期: 2018-08-20; 接受日期: 2018-11-13; 网络版发表日期: 2018-11-28

国家自然科学基金(编号: U1630128, U1737204, 51673205, 51565025)资助项目

摘要 在极端条件下, 材料性能退化是引起航天器失效的主要因素, 而摩擦运动部件的润滑失效是导致材料性能退化的关键所在。聚酰亚胺以其独特的耐高低温性能、优异的机械性能以及独特的自润滑性能而被广泛应用于航空航天等高科技领域。因此研制适用于不同工况需求的高性能聚酰亚胺自润滑复合材料具有重大的意义。基于国内外研究进展, 本文介绍了中国科学院兰州化学物理研究所近年来在极端条件下的聚酰亚胺自润滑材料研究成果, 并对未来聚酰亚胺润滑材料的设计思路与发展趋势进行了展望。

关键词 极端条件, 聚酰亚胺, 复合材料, 自润滑

1 引言

作为我国七大战略新兴产业和“中国制造2025”重点发展的十大领域之一, 新材料被认为是21世纪最具发展潜力并对未来发展有着巨大影响的高技术产业。我国太空探索的不断深入, 对航天器的关键和薄弱零部件之一的润滑材料提出了更高的要求。然而, 空间摩擦与润滑问题通常涉及环境介质、高低温、高速度、高真空、高应力、强辐射等极端条件, 要求润滑材料不但具备良好的机械性能、优异的高低温性能以及耐辐照性能, 同时兼备高精度与长寿命。因此, 设计适用于空间环境的新型聚合物润滑材料迫在眉睫。

聚酰亚胺(polyimide, PI)是综合性能最佳的有机

高分子材料之一(图1)。由于其优异的耐高低温性能, 良好的机械性能和突出的耐辐照、耐腐蚀性能等特点, 在航空航天等许多高新技术领域具有广阔的应用前景^[1,2]。此外, 聚酰亚胺因其独特的自润滑性能而被广泛地应用于润滑材料的设计。近些年, 国内外关于聚酰亚胺相关领域的研究十分活跃, 特别是针对不同种类树脂的耐温等级及成型工艺^[3,4]。目前关于聚酰亚胺的产品种类繁多, 国际上主要有DuPont公司的Vespel系列, 其长期工作温度可达288℃; Ensinger公司的Tecasint-PI可在-100~300℃下长期使用, 短期可以在350℃下使用, 玻璃化转变温度高达400℃; Celazole生产的聚苯并咪唑可长期在430℃下使用, 短期可在760℃下使用, 玻璃化转变温度为427℃。国内主要有

引用格式: Duan C, Shao M, Li S, Zhang X, Wang C, Wang Q, Wang T. The research progress in polyimide self-lubricating composites under extreme conditions. *Sci Sin Chim*, 2018, 48: 1561–1567, doi: [10.1360/N032018-00188](https://doi.org/10.1360/N032018-00188)

图1 不同聚合物的耐温等级和服役温度分类(网络版彩图)
Figure 1 Classification of temperature resistance grade and service temperature of different polymers (color online).

上海合成树脂研究所的YS-20(工作温度可达260℃)及YS-30系列^[5];中国科学院化学研究所不同耐温等级的KH系列,温度高达310~426℃^[6]。虽然国内在聚酰亚胺耐温等级上取得了一定的突破,但是和国外相比,还存在一定的差距。而且作为自润滑材料,因纯PI在极端条件下的磨损严重、机械性能严重衰退,不适宜单独使用,必须对其进行改性处理。纵观国内,针对不同极端条件,设计不同聚酰亚胺的自润滑复合材料的报道尚不多见。

近年来,中国科学院兰州化学物理研究所在极端条件下的聚酰亚胺自润滑复合材料设计方面展开了系统性的基础与应用研究工作,本文对近几年来取得的研究进展做一综述,并对在极端条件下的摩擦磨损机理进行探讨,包括:(1)耐高低温聚酰亚胺自润滑复合材料;(2)耐空间辐照聚酰亚胺自润滑复合材料;(3)多孔含油聚酰亚胺润滑材料。

2 耐高低温聚酰亚胺自润滑复合材料

复杂多变的空间环境对聚酰亚胺自润滑材料设计提出了极大的挑战。首先,航天器在环绕地球飞行时,近地轨道的气压处于 10^{-5} ~ 10^{-7} Pa范围,航天器舱内真空度可达 10^{-4} Pa,太空高轨道的气压可低至 10^{-11} Pa量级^[7,8]。其次,由于受到运行轨道、姿态、方位、结构形态以及表面性质的影响,航天器在运行过程中处于温度交变的环境中。月球表面几乎没有大气活动和大气层,不能像地球那样通过大气分子散射阳光,因此月球昼夜交替没有过渡,温差很大,阴影区的温度极

低,在-180~-160℃左右,而全日照时温度可高达130~150℃^[9]。在这种极端条件下要求润滑材料免维护且长期在宽温域(-200~200℃)下保持良好的润滑效果。然而,一般的润滑剂对温度依赖性很强(图2)。例如,油脂的最高使用温度为200℃,石墨的润滑效果随温度的升高逐渐降低。迄今为止,科研人员没有发现一种润滑剂能满足在较宽的温度范围具有稳定的摩擦系数和较低的磨损率的要求。因此,探究不同温度阶段润滑剂的润滑机理、复配优化、协同作用对耐高低温聚酰亚胺自润滑复合材料的设计有着深远的意义。

2.1 耐低温聚酰亚胺自润滑复合材料

真空和低温这两个因素决定了润滑材料要具备以下特点:良好的耐热性、良好的韧性和不依靠氧化膜润滑。起初,我们对代表性的商用PI(YS-20)进行热机械性能分析,发现其不但在231.9℃时出现玻璃化转变(α 转变),并分别在98.5和-76.5℃时出现 β 和 γ 松弛。其中, α 转变为PI链段开始运动的温度, β 转变为组成聚酰亚胺的二胺和二酐部分的运动, γ 转变则是苯基的振动。低温时PI储能模量很高,即刚性很强; β 松弛之后储能模量下降一半;温度高于玻璃化转变温度,PI基本失去力学强度。基于上述发现,我们通过限定摩擦实验载荷(5 N)、滑动速度(0.13 m/s)、真空度(10^{-5} Pa)、环境温度(-120~20℃),得到低温条件下PI的摩擦系数和磨损率均有一定程度的降低。由Archard磨损方程得知材料的机械性能与其磨损率成反比,所以在低温条件下PI的磨损率降低^[10];而聚合物摩擦系数的主要组成为黏附摩擦系数(μ_A)、形变迟滞摩擦系数(μ_D)以及犁削摩擦系数(μ_F)。光滑表面PI低温条件下的摩擦系数大小主要取决 μ_A 和 μ_F ,其分别与硬度和弹性模量成反比^[11]。低温条件下PI的模量和硬度变大,从而使摩擦系数减小^[12]。由于聚酰亚胺的分子结构(芳香环)十分相似,以上分析结果具有一定的普适性。

图2 不同润滑材料适用的温度区间(网络版彩图)
Figure 2 Different lubricating materials used at optimal temperature (color online).

基于上述分析, 我们利用芳纶纤维(AF)和聚四氟乙烯(PTFE)进一步对不同牌号的PI进行机械性能和低温润滑性能改性. AF是一种新型高科技合成纤维, 具有超高强度、高模量和耐高温、耐酸耐碱、重量轻等优良性能. 而且它还具有良好的绝缘性和抗老化性能, 同时兼具很长的生命周期. PTFE分子链之间极易滑移, 因此在低温环境下表现出低摩擦的特性, 自润滑性能优良. 通过探究真空低温环境下的聚酰亚胺复合材料摩擦学性能, 我们发现: (1) 添加AF能增强复合材料的弹性模量和硬度, 而加入PTFE降低了PI的力学性能; (2) 适量的加入AF和PTFE后能够有效提高PI复合材料的低温摩擦磨损性能^[13,14].

2.2 耐高温聚酰亚胺自润滑复合材料

相对于低温真空润滑材料而言, 耐高温聚酰亚胺自润滑材料主要以研究更高耐温等级的基体树脂和适宜温度范围的自润滑复合材料展开. 目前, 中国科学院兰州化学物理研究已经成功研制出不同耐温等级的聚酰亚胺(320~450℃)及其自润滑复合材料, 部分产品已经走向商业化.

2.2.1 不同结构与分子量的聚酰亚胺高温摩擦学性能探究

分子微观结构影响聚合物的性能, 而材料性能决定其最终的用途. 根据合成聚酰亚胺过程中的经验, 我们得出, 大分子链的刚性越强, 分子链间作用力越强, 耐温等级越高, 然而熔融性能变差, 限制了其成型工艺^[15]. 此外, 不同的单体结构、分子量对聚酰亚胺的摩擦学性能起着至关重要的影响. 由于热固性聚酰亚胺的耐温等级一般高于热塑性的聚酰亚胺, 所以本文主要讨论的是热固性聚酰亚胺的高温摩擦磨损行为. 通过两步法合成聚酰亚胺, 并对不同分子量、分子结构对高温摩擦学性能的影响探究, 我们发现: (1) 相同结构单元, 模塑粉分子量对聚酰亚胺的机械性能起着决定性作用. 适度的分子量有利于提高聚合物的弯曲强度和弹性模量. 随分子量的增大, 交联活性位点降低, 交联度减小, 耐温等级明显降低^[16]; (2) 随环境温度的升高, 分子量对摩擦系数和磨损率影响逐渐减小, 而环境温度成为关键因素; (3) 在聚酰亚胺分子链中, 线性单体结构含量较高的PI表现出了较小的摩擦系数及良好的抗磨性能. 原因归结于聚合物中线性分

子链的有序排列导致了其较高的弹性模量和硬度, 从而有利于摩擦学性能提高^[17,18].

2.2.2 不同温度阶段的固体润滑剂的复配优化

众所周知, 石墨的润滑性能引发了科研工作者进一步对类石墨结构的“二维”润滑剂的探索. 然而, 不同的“二维”润滑剂对温度因素十分敏感, 可作为高温润滑剂的选择少之又少^[19]. 近几年, 我们在对已有的“二维”材料改性聚酰亚胺高温润滑性能进一步探究的同时, 也发现了新的适宜高温润滑的“二维”材料.

六方氮化硼(h-BN)的结构类似于石墨, 其层间剪切力较低, 并且具有优良的耐高温性能及较高的热导率(图3). 不同于石墨及MoS₂在高温下润滑性能的减弱, 氮化硼具有优良的耐高温性能, 是一种优良的耐高温固体润滑剂. 但是室温及较低温度下的润滑性能并不理想. 因此, 利用石墨的低温润滑与BN高温润滑的协同效应, 我们制备了室温到300℃宽温域的PI自润滑复合材料(摩擦系数变化范围为0.08~0.22)^[20,21]. 在热烧结三聚氰胺过程中发现类似于石墨结构的g-C₃N₄展现出良好的热稳定性及高温抗磨耐磨性能(复合材料的磨损率可达10⁻⁶数量级)^[22,23]. 通过进一步以不同纤维增强和润滑剂改性, 得到了适宜不同温度范围的聚酰亚胺自润滑复合材料, 特别在高温(>250℃)条件, 摩擦系数(<0.1)十分稳定且磨损率低至10⁻⁶数量级^[24-26].

综上, 我们设计并制备了一系列耐高低温聚酰亚胺自润滑复合材料, 并对其高低温摩擦磨损机理进行了初步的探究, 但还面临诸多挑战: (1) 聚合物自身一些关键性问题尚不明确, 微观结构和宏观性能之间的联系有待进一步探究; (2) 聚合物摩擦学属于表界面科学, 影响因素诸多, 缺乏可靠的理论指导; (3) 实际工况复杂多变, 模拟条件与实际应用环境还存在一定距离.

图3 纳米氮化硼(a)和g-C₃N₄(b)的形貌图

Figure 3 Morphology of (a) nano boron nitride and (b) graphitic carbon nitride (g-C₃N₄).

3 耐空间辐照聚酰亚胺自润滑复合材料

聚合物材料在空间领域使用时受到空间离子辐照后, 其表面性能发生变化, 从而影响其润滑性能和使用寿命. 在低地球轨道(low earth orbit, LEO)环境下, 主要的辐照因素有原子氧和紫外线; 在同步轨道中, 电子和质子是主要的辐照因素^[27,28].

基于以上苛刻环境, 中国科学院兰州化学物理研究所利用空间辐照环境地面模拟设备(图4), 系统研究了空间环境中的原子氧、紫外线、质子和电子等辐照对航天器部件典型润滑材料聚酰亚胺的摩擦学性能的影响, 并揭示了材料组成、辐照形式和摩擦磨损性能之间的关系, 探讨了影响机理.

通过分析原子氧和紫外辐照后的聚酰亚胺材料表面化学成分的变化, 我们发现对于纯PI, 紫外辐照后的材料表面碳氧比从3.7下降到3.2, 原子氧辐照后碳氧比变为2.1. 表明紫外辐照后的聚酰亚胺表面氧元素相对含量略有增加, 而原子氧辐照后的氧元素相对含量增幅较大. 并且PI在真空条件下的摩擦系数为0.30左右, 紫外辐照后的摩擦系数升高到0.34左右, 原子氧辐照只是对PI初始阶段的摩擦系数影响十分明显. 紫外和原子氧辐照后聚酰亚胺的磨损率均有不同程度的上升, 其中原子氧辐照后磨损率的上升幅度较大, 这与原子氧的氧化侵蚀密切相关^[29-31]. 质子辐照会引起PI表面分子链结构发生一定程度的降解, 在对材料很浅表面造成损伤的同时形成一层富碳结构. 这种富碳结构的形成改变了材料表面硬度和表面能, 且质子辐照引起的碳化表面在摩擦过程中很容易被磨穿, 所以辐照后的PI出现了起始的高摩擦系数, 磨损率同时也被提高. 此外, 辐照后PI的摩擦磨损特性发生了明显变化. 质子辐照前, PI的磨损机理主要是黏着磨损, 辐照后PI的磨损机理由黏着磨损转变成三体磨损(图5)^[32,33].

此外, 质子和电子单独辐照及综合辐照都会导致PI材料表面分子链结构发生降解, 表面形成富碳结构, 从而影响PI的微观硬度、黏附力及摩擦学性能. 并且质子对材料造成的影响大于电子, 二者综合辐照影响最大, 但是小于两者之和. 事实证明质子和电子辐照之间不存在协同效应. 相反质子辐照形成的富碳结构对基体材料起到一定的保护作用, 减弱了电子辐照对材料的进一步损伤. 通过观察电子辐照后的材料磨损形貌变化, 可知电子辐照对聚酰亚胺复合材料的表面

图4 空间辐照环境地面模拟装置. (a) 原子氧辐照; (b) 紫外、质子和电子辐照环境(网络版彩图)

Figure 4 Photograph of space irradiations in the ground-based simulation system: (a) AO irradiation, (b) UV, Pr and El irradiations (color online).

图5 质子辐照前后磨损机理变化的示意图(网络版彩图)

Figure 5 The schematic of the evolution process of wear mechanism (color online).

结构影响较小. 而且在制备不同聚酰亚胺自润滑复合材料过程中, 发现纳米 ZrO_2 填料能够提高复合材料的耐原子氧特性, 这主要归结于复合材料表面形成富含 ZrO_2 的表面层, 阻止原子氧的进一步侵蚀. ZrO_2 含量为1%的 ZrO_2/PI 复合材料在原子氧辐照前后能够保持相对稳定的摩擦磨损性能, 有望成为一种潜在的航天器设计用摩擦副材料^[34].

4 多孔含油聚酰亚胺润滑材料

航天器传动部件要求润滑材料具有高精度、高集成、高可靠性、小体积、长寿命、免维护等特点. 因此, 开展多孔含油聚酰亚胺(PPIO)自润滑材料的研究工作, 将对开发高精度、高可靠性、长寿命的航天器产生重要的现实意义.

多孔聚酰亚胺材料结合了聚酰亚胺材料 and 多孔结构的特点, 为极端环境下自润滑材料的选择提供了新的思路. 与无机材料相比, 多孔聚酰亚胺材料具有质轻、比强度高、耐腐蚀性强、密度小、噪音小、含油率高、对润滑油的吸附力强、自润滑性能好、使用寿命长等优点^[35]. 在运行条件下, 浸入PPIO的润滑油在

压力和温度刺激下被挤出至滑动表面从而起到良好的润滑效果; 同时, 当处于非工况条件下, 滑动表面的润滑油在多孔聚酰亚胺的毛细管作用力下被重新吸收至内部存储起来; 如此动态循环, 以满足传动部件的高精度和长寿命需求(图6)^[36].

结构有序、孔径可控、形貌多样的聚合物多孔材料的制备仍然存在很大问题. 我们采用二氧化硅(SiO_2)胶体球作硬模板, 提出了一种适合大面积制备孔径可控、孔隙分布均匀的PI大孔材料的方法(图7), 该方法简便易行、成本低廉, 非常适合大规模生产^[37].

然而, 模板法制备的多孔聚酰亚胺材料孔隙贯通性差, 存在一定量的闭孔, 缩短了润滑寿命. 基于此局限性, 我们采用冷压-定容热烧结法制备孔道贯通、无闭孔的多孔聚酰亚胺材料. 此外, 在含油性能评价体系中, 含油率和含油保持率是两个基础的关键因素. 在保持较高含油率和含油保持率的基础上, 多孔材料才能持续稳定地提供润滑油, 进而实现航天器的高精度和长寿命性. 基于成熟的制备技术, 我们进一步研究了多孔聚酰亚胺的含油性能. 在传统方法中, 单一通过调节孔径来均衡含油率和含油保持率的方法已无法满足更高精度、更长寿命的润滑需求. 我们率先采用氨基硅油化学改性方法, 提高了大孔聚酰亚胺材料的含油保持率, 为进一步提高多孔材料的含油性能提供了崭新的方向^[38]. 基于以上工艺, 我们制备了适合不同种类油的多孔聚酰亚胺轴套和保持架商品. 而且在轴承保持架内的应用, 能使寿命长达15年之久, 克服了国内长期以来的润滑技术瓶颈(图8).

图6 多孔含油聚酰亚胺润滑机理(网络版彩图)

Figure 6 Lubrication mechanism of porous oil-containing polyimide (color online).

图7 孔径分布均匀的聚酰亚胺材料

Figure 7 Polyimide with uniform pore size distribution.

图8 长寿命多孔含油聚酰亚胺轴保持架(网络版彩图)

Figure 8 Long-life porous oil-containing polyimide bearing cage (color online).

5 总结与展望

近几十年来, 中国科学院兰州化学物理研究所对极端条件下的聚酰亚胺自润滑复合材料的研究取得了一定的进展, 但是关于聚酰亚胺自润滑材料的研发依然难以满足苛刻工况的要求, 部分摩擦磨损机理尚未明确. 鉴于此, 未来极端条件下的聚酰亚胺自润滑材料研究应从以下三方面进行深入展开: (1) 突破聚酰亚胺材料的耐温性能限制, 探究不同温度阶段聚酰亚胺材料与润滑剂的复配优化、协同作用及失效机理, 建立数字化数据库, 为今后润滑材料设计提供理论指导; (2) 搭建摩擦学性能原位测试-分析空间辐照环境地面模拟装置, 原位分析材料的耐辐照性能、摩擦磨损性能与微观结构的关联性; (3) 开发新型孔结构制备方法, 提高控制精度与寿命, 以开辟高精度、长寿命、多功能智能润滑材料领域.

参考文献

- 1 Yokota R, Yamamoto S, Yano S, Sawaguchi T, Hasegawa M, Yamaguchi H, Ozawa H, Sato R. *High Perform Polym*, 2001, 13: S61–S72
- 2 Yoonessi M, Gaier JR, Sahimi M, Daulton TL, Kaner RB, Meador MA. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9: 43230–43238
- 3 Smith JG Jr., Connell JW, Hergenrother PM. *J Composite Mater*, 2000, 34: 614–628
- 4 Dhara MG, Banerjee S. *Prog Polym Sci*, 2010, 35: 1022–1077
- 5 Tang Q, Yan C. *Chem World*, 1980, 2: 9–10 (in Chinese) [唐泉清, 严春良. 化学世界, 1980, 2: 9–10]
- 6 Yang S, Fan L, Chen J, Hu A, Yang H. *Thermosetting Resin*, 2008, 23: 32–35 (in Chinese) [杨士勇, 范琳, 陈建升, 胡爱军, 杨海霞. 热固性树脂, 2008, 23: 32–35]
- 7 Yu D, Weng L, Ouyang J. *Tribology-Beijing*, 1996, 16: 89–96
- 8 Briscoe HM. *Tribol Int*, 1990, 23: 67–74
- 9 Zou Y, Ouyang Z, Xu L, Liu J, Xu T. *Quatern Sci*, 2002, 22: 533–539 (in Chinese) [邹永廖, 欧阳自远, 徐琳, 刘建军, 胥涛. 第四纪研究, 2002, 22: 533–539]
- 10 Chen J, An Y, Yang J, Zhao X, Yan F, Zhou H, Chen J. *Surf Coatings Tech*, 2013, 235: 521–528
- 11 Bowden F P, Talbot D. *Friction and Lubrication of Solids*. Beijing: China Machine Press, 1986. 272–273 (in Chinese) [鲍登F P, 泰伯D. 固体的摩擦与润滑. 北京: 机械工业出版社, 1986. 272–273]
- 12 Wang Q, Zheng F, Wang T. *Cryogenics*, 2016, 75: 19–25
- 13 Zheng F, Wang Q, Wang T. *J Macromol Sci Part B*, 2015, 54: 927–937
- 14 Lv M, Zheng F, Wang Q, Wang T, Liang Y. *Tribol Int*, 2015, 92: 246–254
- 15 Duan C, Cui Y, Wang C, Tao L, Wang Q, Xie H, Wang T. *Tribology*, 2017, 37: 717–724 (in Chinese) [段春俭, 崔宇, 王超, 陶立明, 王齐华, 谢海, 王廷梅. 摩擦学报, 2017, 37: 717–724]
- 16 Wang Y, Wang T, Wang Q. *Tribol Int*, 2014, 78: 47–59
- 17 Wang Y, Tao L, Wang T, Wang Q. *RSC Adv*, 2015, 5: 101533–101543
- 18 Duan C, Yang Z, Zhang D, Tao L, Wang Q, Wang T. *Tribol Int*, 2018, 121: 373–380
- 19 Allam IM. *J Mater Sci*, 1991, 26: 3977–3984
- 20 Wang Y, Cai P, Wang T, Wang Q. *J Tribol*, 2017, 140: 011605
- 21 Zhang X, Pei X, Wang Q. *Mater Chem Phys*, 2009, 115: 825–830
- 22 Duan C, Yuan D, Yang Z, Li S, Tao L, Wang Q, Wang T. *Compos Part A*, 2018, 113: 200–208
- 23 Zhang L, Qi H, Li G, Wang D, Wang T, Wang Q, Zhang G. *Mater Des*, 2017, 129: 192–200
- 24 Zhao G, Hussainova I, Antonov M, Wang Q, Wang T, Yung DL. *Tribol Int*, 2015, 82: 525–533
- 25 Zhao G, Hussainova I, Antonov M, Wang Q, Wang T. *Wear*, 2013, 301: 122–129
- 26 Zhao G, Ding Q, Wang Q. *Polym Compos*, 2016, 37: 2541–2548
- 27 Liu Y. *Spacecraft Environ Eng*, 2007, 6: 010
- 28 Grossman E, Gouzman I. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2003, 208: 48–57
- 29 Zhao G, Liu B, Wang Q, Wang T. *Surf Interface Anal*, 2013, 45: 605–611
- 30 Zhao G, Liu B, Wang Q, Wang T P I. *Mech Eng J-J Eng*, 2012, 226: 864–872
- 31 Zhao G, Ding Q, Wang Q, Wang T. *J Macromol Sci Part B*, 2015, 54: 593–604
- 32 Lv M, Zheng F, Wang Q, Wang T, Liang Y. *Wear*, 2014, 316: 30–36
- 33 Zheng F, Zhang X, Zhao G, Wang Q, Wang T. *J Appl Polym Sci*, 2014, 131
- 34 Lv M, Wang Q, Wang T, Liang Y. *Compos Part B-Eng*, 2015, 77: 215–222
- 35 Wang Q, Wang C, Wang T. *J Colloid Interface Sci*, 2013, 389: 99–105
- 36 Lv M, Han F, Wang Q, Wang T, Liang Y. *High Perform Polym*, 2017, 29: 170–177
- 37 Wang C, Wang Q, Wang T. *Langmuir*, 2010, 26: 18357–18361
- 38 Zhang D, Wang T, Wang Q, Wang C. *J Appl Polym Sci*, 2017, 134: 45106

The research progress in polyimide self-lubricating composites under extreme conditions

Chunjian Duan^{1,2}, Mingchao Shao^{1,2}, Song Li^{1,2}, Xinrui Zhang¹, Chao Wang¹, Qihua Wang¹, Tingmei Wang^{1*}

¹ State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author (email: tmwang@licp.cas.cn)

Abstract: Under extreme conditions, the degradation of materials mainly caused the failure of spacecraft missions, but the lubrication failure plays an important role in this degradation. Polyimide, with its unique high and low temperature resistance, excellent mechanical as well as special self-lubricating properties, is widely used in high-tech fields such as aerospace. Therefore, it is of great significance to develop polyimide self-lubricating composites applied in different conditions. Based on research of both domestic and overseas, this feature article introduces the research progress in polyimide self-lubricating materials of Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences. Furthermore, the methods for designing polyimide-lubricating materials in the future and its development tendency are put forward.

Keywords: extreme conditions, polyimide, composites, self-lubricating

doi: [10.1360/N032018-00188](https://doi.org/10.1360/N032018-00188)