

·综述·

聚酰亚胺工程塑料高温摩擦性能研究进展

张世伟¹ 董源² 杨睿¹ 苏正涛^{1*} 杨海霞^{2*}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 极端环境高分子材料重点实验室,
中国科学院化学研究所, 北京 100190)

摘要: 聚酰亚胺 (PI) 工程塑料以其优异的耐高低温性能、卓越的耐磨性和自润滑性能而著称, 在航空航天、微电子和机械制造等高新技术领域具有广泛的应用。为满足高端装备在高温环境下对保持优异综合性工程塑料的迫切需求, 解决聚酰亚胺材料在高耐热性与成型工艺性之间的矛盾, 以及耐高温与耐磨自润滑兼容性问题, 研究人员深入探索了多种改性策略, 旨在提升聚酰亚胺在高温条件下的摩擦学性能。本文综述了耐高温聚酰亚胺耐磨材料的制备技术, 并系统分析了分子结构设计和填料选择如何影响聚酰亚胺的高温摩擦性能。同时, 针对当前聚酰亚胺高温耐磨材料所面临的挑战, 提出了作者的见解, 并对未来研究方向进行了展望, 希望促进聚酰亚胺材料在高温耐磨应用领域的进一步发展和应用。

关键词: 聚酰亚胺; 高温摩擦; 分子结构; 高温耐磨填料

Research Progress on the High-temperature Friction Properties of Polyimide Engineering Plastics

ZHANG Shi-wei¹, DONG Yuan², YANG Rui¹, SU Zheng-tao^{1*}, YANG Hai-xia^{2*}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China;

2. Key Laboratory of Polymeric Materials in Extreme Environments, Institute of Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Polyimide (PI) engineering plastics are renowned for their excellent resistance to extreme temperatures, outstanding wear resistance, and self-lubricating properties, making them widely applicable in high-tech fields, such as aerospace, microelectronics, and mechanical manufacturing. In response to the growing and urgent demand for engineering plastics that maintain superior comprehensive performance in high-temperature environments, as well as the challenges posed by the trade-off between the high thermal resistance and processability of polyimide, and the scientific issue of simultaneously achieving high-temperature resistance, wear resistance, and self-lubrication, researchers have explored various modification strategies to enhance the tribological performance of polyimide under high-temperature conditions. This paper reviews the preparation techniques for high-temperature-resistant and wear-resistant polyimide materials and systematically analyzes the influence of molecular structure design and filler selection on the high-temperature tribological properties of polyimides. Additionally, the challenges currently faced by high-temperature wear-resistant polyimide materials are discussed, and insights into future research directions are provided to promote the further development and application of polyimides in high-temperature wear-resistant fields.

Keywords: Polyimide; High-temperature friction; Molecular structure; High-temperature wear-resistant fillers

2024-12-10 收稿, 2025-01-19 录用, 2025-02-26 网络出版

* 通信联系人: 苏正涛, E-mail: ztsu@263.net; 杨海霞, E-mail: yanghx@iccas.ac.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.24.377

引用: 张世伟, 董源, 杨睿, 苏正涛, 杨海霞. 聚酰亚胺工程塑料高温摩擦性能研究进展. 高分子通报, 2025, 38(6), 868–879.

Citation: Zhang, S. W.; Dong, Y.; Yang, R.; Su, Z. T.; Yang, H. X. Research progress on the high-temperature friction properties of polyimide engineering plastics. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2025, 38(6), 868–879.

随着航空航天、微电子和机械制造等高科技领域的迅猛发展, 对材料的性能要求也日益提高。特别是在航空发动机轴承、高速切削工具和热加工模具等关键部件, 它们在工作时常常面临 200 °C 甚至更高的极端温度环境^[1,2]。聚合物基复合材料因其出色的自润滑性、轻质特性, 以及卓越的力学性能和耐腐蚀能力, 在摩擦学领域得到了广泛应用。聚酰亚胺刚性共轭的主链结构赋予了材料卓越的耐高温、耐化学腐蚀和耐磨自润滑性能, 该材料的长期使用温度可达到 300 °C, 短期耐热温度甚至可超过 500 °C^[3]。室温下, 与其他工程塑料相比, 聚酰亚胺工程塑料具有更为优异的耐磨、自润滑性能, 在航空航天领域, 广泛应用于轴承、密封件、衬套、齿轮和阀门零件等关键部件的制造^[4–6]。然而, 在高温下, 赋予聚酰亚胺工程塑料更好的耐磨性和更低的摩擦系数仍然是一个挑战。一方面, 由于耐高温聚酰亚胺分子链的作用力较强, 难溶难熔特性限制了其成型工艺; 聚酰亚胺的分子结构和分子量与材料高温下的机械性能密切相关, 进而影响聚酰亚胺高温下的摩擦磨损机制。例如, 一些适用于室温下的聚酰亚胺耐磨工程塑料, 在高温下极易发生软化, 导致机械性能降低, 限制了它们在高温滑动条件下的应用范围。另一方面, 许多固体润滑填料在高温下的润滑性能会迅速降低, 不同的固体润滑填料对温度的响应敏感程度不同, 进而产生不同的摩擦磨损机制^[7–9]。

目前, 关于聚酰亚胺工程塑料高温下摩擦学的研究主要可以归纳为两类, 第一类主要研究聚酰亚胺不同分子结构和分子量与高温摩擦性能的关系。通过这些研究, 研究者们揭示了分子链交联度、柔性、极性和分子量对聚酰亚胺高温摩擦性能的影响, 并为得到适用于高温下的聚酰亚胺耐磨材料提供参考^[10–12]; 第二类则是专注研究不同润滑填料改性聚酰亚胺摩擦性能的合适温度范围。通过解释填料增强聚酰亚胺的摩擦磨损机制和使用温度范围, 从而可以更好地设计宽温域下的聚酰亚胺基耐磨工程塑料。本文首先从聚酰亚胺耐磨材料的成型工艺出发, 详细介绍了制备高

温下耐磨工程塑料的方法; 在此基础上, 总结了近年来提升聚酰亚胺高温摩擦性能的分子结构调控策略和固体润滑填料的选择方法; 最后提出了对未来研究方向的建议, 希望能为相关领域的研究人员提供有价值的参考和启示。

1 聚酰亚胺工程塑料耐磨材料的制备方法

聚酰亚胺前驱体的制备可以通过一步法或两步法实现, 成型工艺的多样性使得聚酰亚胺能够被加工成板材、棒材、薄膜、泡沫、气凝胶、涂层等多种形态, 以满足不同的应用需求^[13–18]。本文将重点综述适用于高温环境下聚酰亚胺工程塑料耐磨材料的制备方法, 具体成型方法如图 1 所示。

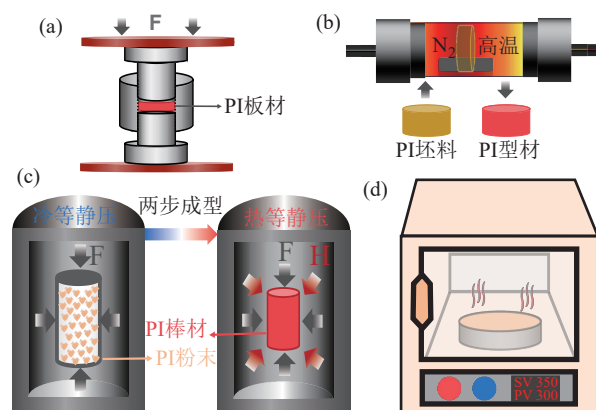


图 1 耐高温聚酰亚胺摩擦材料成型示意图: (a) 热模压成型, (b) 直接成型, (c) 等静压成型, (d) 烘涂成型

Figure 1 Molding and friction diagram of high-temperature resistant polyimide friction material: (a) hot molding; (b) direct forming; (c) isostatic pressing; (d) bake coating molding

1.1 热模压成型

热模压成型制备板材适用于热塑性和热固性聚酰亚胺体系, 该工艺下的聚酰亚胺板材具有较高的机械强度和稳定的摩擦因数, 是目前制备耐磨聚酰亚胺工程塑料常用的方法。主要制备过程是将聚酰亚胺前体粉末放入特定模具中, 根据聚酰亚胺树脂体系的结构特点, 选择适宜的时间、温度和压力条件, 以制备出更加致密的块体材料, 如图 1(a) 所示。热模压成型后的板材可以根据具

体需求进一步加工,以制备成适应各种应用场景的耐磨零件。

1.2 直接成型和等静压成型

直接成型和等静压成型可以有效解决不熔不溶聚酰亚胺难以加工成型的难题。美国 Dupont 公司在 20 世纪就利用这 2 种先进的成型技术,成功制备了多种 Vespel 系列产品。这些产品以其卓越的性能广泛应用于航空航天、机械制造、电子等领域,其中代表性的商品包括 SP-1、SP-21、SCP-5000、SCP-5050 等。

直接成型方法以其操作简单、成本低廉而受到青睐,特别适合批量生产小型零件^[19,20]。然而,这种方法通常需要较大的压力,并且对设备和烧结气氛有严格的要求,限制了其在制备大型聚酰亚胺型材方面的应用。具体操作步骤包括:首先在室温下利用压机将酰亚胺前体粉末压成坯料,然后将其放入充满氮气的管式炉或烘箱中进行烧结处理,最终得到致密化的聚酰亚胺板材,如图 1(b)所示。尽管直接成型方法具有操作简单和成本低的优势,但制备的聚酰亚胺材料通常不具备各向同性,导致力学强度在不同方向上存在差异。等静压成型技术则有效克服了这一缺点,能够制备出各向同性的聚酰亚胺棒状材料。该方法是基于粉末冶金技术的一种特殊的成型方式,一般包含冷-热等静压 2 个环节:冷等静压是将酰亚胺化的聚酰亚胺前驱体粉末放入可变形的模具中,并通过液体向模具的各个部位传递压力,得到致密化程度较高的聚酰亚胺坯料。随后,在热等静压炉中进行热等静压处理,通过惰性气体同时加压并传递热量升温,最终冷却至室温得到各向同性的聚酰亚胺棒状材料,如图 1(c)所示^[20,21]。

1.3 烘涂成型

烘涂成型通常用来制备薄膜和涂层,聚酰亚胺涂层以其卓越的综合性能,被视为一种理想的耐高温摩擦材料。烘涂成型工艺主要涉及以下步骤:首先,将聚酰胺酸溶液均匀涂布于经过清洁处理的硬化钢盘上,先去除溶液中的绝大部分水分和有机溶剂。随后,将涂布后的钢盘置于烘箱内,并按照既定的温度程序进行加热处理。待样品冷却至室温后,即可获得具有预定厚度的聚酰亚胺涂层,如图 1(d)所示。该方法简便易行,适用于制备具有特定厚度和性能要求的聚酰亚胺涂层^[22,23]。

2 聚酰亚胺化学结构对高温摩擦性能的影响

聚酰亚胺的合成由二胺和二酐单体通过缩聚反应合成,不同结构的单体对聚酰亚胺分子链的柔性和极性有显著影响,进而影响聚酰亚胺的高温摩擦性能^[7,24]。此外,分子量也是决定聚酰亚胺高温摩擦学性能的关键因素^[25,26]。为了深入理解高温下聚酰亚胺的性能,建立其化学结构与性能之间的关联,并揭示摩擦磨损的内在机理,近期的研究开始集中于分析不同结构聚酰亚胺在摩擦过程中的行为。

2.1 聚酰亚胺交联度与分子量对高温摩擦性能的影响

热塑性聚酰亚胺和热固性聚酰亚胺的交联程度和分子量存在显著差异,这对聚酰亚胺的高温摩擦性能至关重要。丛培红等^[27]通过对比热塑性聚酰亚胺(YS-20)与交联聚酰亚胺(KH-304)在不同温度下的摩擦磨损性能,发现热塑性聚酰亚胺的摩擦系数随温度升高先增大后减小,而交联聚酰亚胺的摩擦系数则随温度升高逐渐降低。这种差异性可能源于热塑性聚酰亚胺在温度升高时储能模量发生显著变化,而交联聚酰亚胺在摩擦界面上可能发生化学反应,导致其化学结构发生改变。Wang 等^[25]在研究热塑性聚酰亚胺(YS-20)和 4-苯乙炔苯酐(4-PEPA)封端的热固性聚酰亚胺的摩擦系数随温度变化的规律时,也观察到了类似的趋势。

分子量对聚酰亚胺高温摩擦性能的影响一方面是通过影响聚酰亚胺的机械性能、模量等进一步改变高温下的摩擦性能;另一方面分子量的增加会加剧聚酰亚胺高温下的黏着磨损,因此设计一个合理的分子量是改性聚酰亚胺高温摩擦性能的关键。此外,在高温环境下,环境温度对聚酰亚胺摩擦性能的影响可能会大于分子量对聚酰亚胺摩擦性能带来的影响^[25,26,28-30]。

2.2 聚酰亚胺主链柔性链段对高温摩擦性能的影响

调控聚酰亚胺主链结构的柔性是改变聚酰亚胺机械性能和耐温等级的有效策略,这一方法也通常可以调控聚酰亚胺的高温摩擦性能。段春俭等^[31]通过引入不对称的二胺单体 3,4'-二氨基二苯醚(3,4'-ODA)到热固性聚酰亚胺的主链结构中,研究了聚酰亚胺磨损率随温度变化的规律。实验

结果表明, 聚酰亚胺的摩擦系数随温度的升高持续降低, 而磨损率则呈现出先升高后降低再升高的复杂趋势。这种变化主要归因于该主链结构聚酰亚胺在摩擦过程中接触表面机械性能的动态变化。为了提升聚合物的高温摩擦性能, 提高其机械性能是一条有效的途径。Yin 等^[12]利用分子动力学模拟研究了刚性 POSS 结构对聚酰亚胺高温摩擦学性能的影响。模拟结果揭示, 刚性的笼状 POSS 结构能够显著提高聚合物的耐热性能、机械性能以及高温下的摩擦性能。特别是在 600 K 时, 含有 9.0 wt% POSS 的 PI2 模型展现出了极低的摩擦系数(0.091), 从而优化了聚酰亚胺的高温摩擦性能。然而, 当聚酰亚胺树脂基体与纤维、有机或无机固体润滑剂制备成复合材料时, 尽管主链更加刚性的聚酰亚胺具有高强度和高模量, 但其与固体润滑剂的黏附性不足, 导致高温下的摩擦性能下降。Panin 等^[32]对比研究了主链醚键对热塑性聚酰亚胺高温下摩擦性能的影响。他们将 2 种不同结构的聚酰亚胺与短切碳纤维、有机 (PTFE) 和无机 (MoS₂) 固体润滑剂通过模压成型制备成复合材料。研究结果表明, 主链更加柔性的聚酰亚胺高温下与固体润滑剂具有更强的黏附性。在 180 °C 时, 聚合物分子链中存在柔性单元的聚酰亚胺复合材料的磨损率比不含柔性结构聚酰亚胺复合材料低 300 倍。

2.3 聚酰亚胺极性基团对高温摩擦性能的影响

极性较高的聚酰亚胺分子通常具有较高的玻

璃化转变温度, 通过将不同电负性的原子引入聚酰亚胺中可以改变分子极性, 从而可以优化其高温摩擦性能^[33-35]。Li 等^[35]对氟化聚酰亚胺 (FPI) 与非氟化聚酰亚胺 (PI) 在不同温度下的摩擦性能进行了对比研究。研究发现, 非氟化 PI 的摩擦系数在 170 °C 左右开始上升, 在 210 °C 达到最高点, 随后迅速下降。而全氟化 PI 的摩擦系数则在 205 °C 开始上升, 在 225 °C 达到一个相对较低的峰值。含氟二胺单体的引入提高了摩擦系数最低的温度阈值, 这为开发具有更宽温度适用范围的耐磨材料提供了可能性。在 2021 年, Hu 等^[36]通过制备聚酰亚胺 (PI)、氟化聚酰亚胺 (FPI) 和含硫聚酰亚胺 (SPI), 如图 2 所示, 研究了这些不同结构的聚酰亚胺在 -100~100 °C 温度范围内的摩擦学性能。实验结果与分子动力学模拟均表明, 3 种样品与对偶面的黏附能力依次为: FPI>SPI>PI。强电负性 F 和 S 原子的引入增强了分子链的极性, 从而与金属对应物之间的范德华力得到加强, 黏附能力增大, 且更易于发生摩擦化学反应。这些因素共同导致了 FPI 和 SPI 在摩擦磨损性能上表现较差。

3 填料对聚酰亚胺塑料高温摩擦性能的影响关系

3.1 二维填料改性

二维材料因其卓越的机械性能、巨大的比表面积以及超润滑特性, 常被用作增强聚合物自润

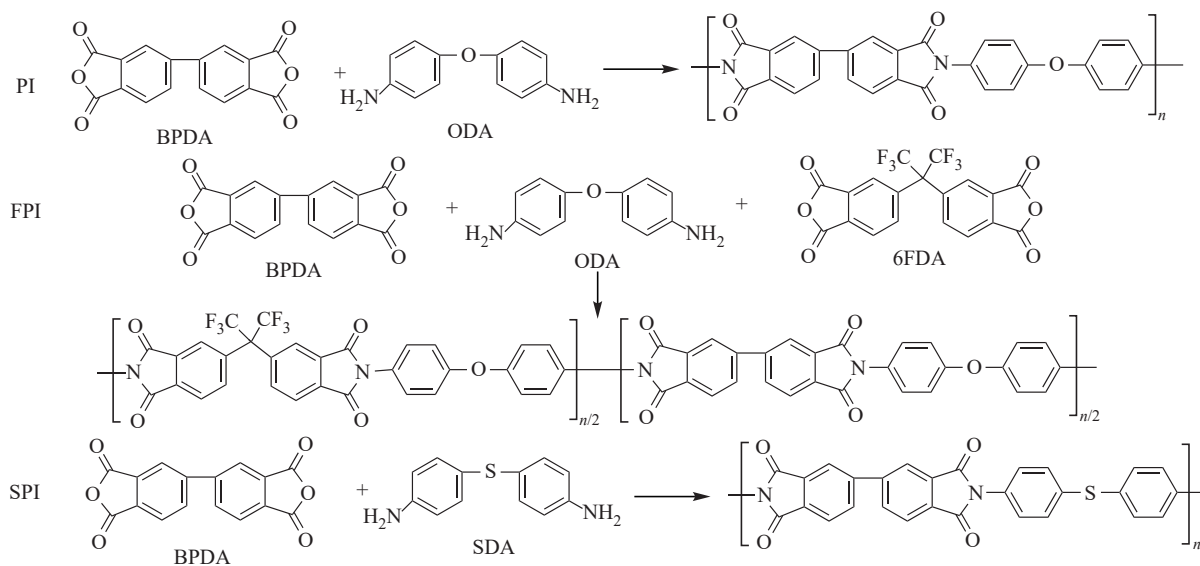


图 2 PI、FPI、SPI 的分子结构图^[36]

Figure 2 Molecular structure diagrams of PI, FPI and SPI^[36]

滑材料的改性剂^[37]。在高温条件下,摩擦磨损过程在纳米尺度上表现出固有的复杂性,而二维材料的发现和应用,使得研究者更加关注微米和纳米尺度滑动界面的摩擦和磨损机制。目前,氮化硼(BN)、MXenes、石墨烯及其衍生物已被证实是改善聚合物纳米复合材料高温摩擦性能的有效二维层状填料。图3汇总了二维填料增强PI工程塑料相比于未填充PI工程塑料摩擦系数和磨损率在不同温度下的改变程度。可以看到,在100~250 °C的温度范围内,蓝色区域内的二维材料改性剂能有效地降低PI工程塑料的高温摩擦系数(COF)。而在更高的温度区间(300 °C及以上),红色阴影区域的二维材料能够保证PI工程塑料维持较优的摩擦性能。此外,黄色阴影区域对应的二维材料在降低PI工程塑料磨损率方面表现出色,表明这些材料在高温下作为有效的添加剂,能够显著提升PI工程塑料的耐磨性能。

氮化硼,以其卓越的导热性能和结构稳定性,已成为改善聚合物摩擦性能的重要添加剂。六方氮化硼(h-BN)是氮化硼中最稳定的晶体形态,其层间范德华力较弱,与石墨结构相似。这种特性使得h-BN能够作为聚酰亚胺的填料,显著提升复合材料的导热性能,有效分散摩擦表面产生的热量,从而在高温环境下保持材料的优异摩擦性能^[42,43]。Li等^[44]对无机填料h-BN、SiO₂以及有机填料PI填充的聚醚醚酮基复合材料的高温摩擦性能进行了研究。研究结果表明,坚硬的无机填料SiO₂能够在高温条件下促进聚合物形成更稳定的摩擦膜。此外,h-BN颗粒之间形成的导热

路径有助于减少热量的积累,从而降低磨损率。Priscila等^[39]通过直接成型法制备了聚酰亚胺-六方氮化硼纳米复合材料。研究发现,高导热性的二维h-BN的加入,不仅提高了聚酰亚胺复合材料的玻璃化转变温度(T_g),而且在300 °C的高温条件下,与纯PI相比,PI-2.0 wt% h-BN和5.0 wt% h-BN的摩擦系数分别提高了26.0%和4.1%,磨损率分别提高了55.8%和70.3%。此外,该复合材料还展现出了卓越的中子屏蔽能力,预示着其在多功能应用领域具有广阔的前景。MXenes是二维过渡金属碳化物、氮化物和碳氮化物的总称,其化学式为 $M_{n+1}X_nT_x$ ($n=1\sim4$),其中M代表3d~5d的过渡金属元素,X是与M键合的C或N, T_x 是过渡金属外表面的键合末端:—O₂、—F₂、—OH、—Cl,以及它们的组合。MXenes是一种新型的二维纳米材料,可以通过不同的过渡金属、碳/氮和表面功能来调节性能,在机械和摩擦学领域有广泛的应用前景^[45~47]。Li等^[38,48]制备的Mo₂CT_x增强聚酰亚胺纳米复合材料在室温到200 °C范围内有较低的磨损率和摩擦系数。在高温下,二维片层Mo₂CT_x的加入不仅可以使往复的剪切强度变低,还可以通过摩擦化学反应产生氧化产物富集在表面形成硬度较高的保护膜,提高聚酰亚胺高温下的摩擦学性能。

石墨烯,一种具有六边形蜂窝状结构的二维材料,以其卓越的机械性能、热稳定性和高导热性而著称。Amit等^[41]采用原位聚合法制备了聚酰亚胺/石墨烯(PI/GP)复合材料,并深入研究了该材料在室温至200 °C范围内的摩擦学性能。研究结

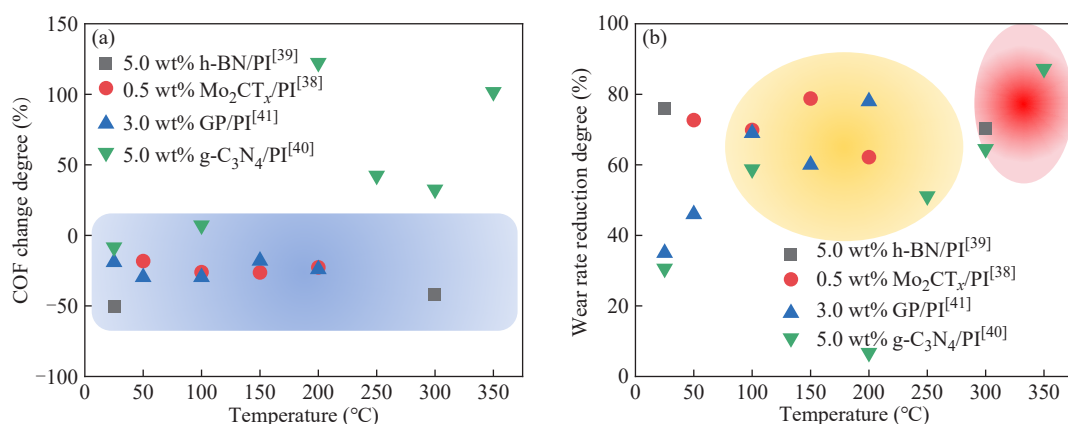


图3 二维材料增强聚酰亚胺工程塑料的摩擦性能:(a)摩擦系数变化程度;(b)磨损率下降程度

Figure 3 Tribological properties of 2D material reinforced polyimide engineering plastics: (a) the change degree of friction coefficient; (b) the variation degree of wear rate

果表明, 石墨烯在聚酰亚胺基体中形成了有机-无机结构, 显著提升了材料的耐热稳定性。在高温条件下, 复合材料能够产生松散的颗粒, 并在摩擦副表面形成有效的摩擦膜。特别是, 添加 3.0 wt% 石墨烯的聚酰亚胺在高温下展现出了最佳的摩擦性能。石墨相氮化碳(g-C₃N₄)是一种类石墨结构的二维层状材料, 因其能够形成具有高模量、高硬度的转移膜, 从而有效降低磨损, 常被用作在苛刻条件下改善聚合物摩擦性能的改性剂。Duan 等^[40]研究了高温下二维 g-C₃N₄ 材料填充的热固性聚酰亚胺, 并与纯树脂在室温至 350 °C 下的性能进行比较。结果表明, 二维片层的 g-C₃N₄ 的加入显著增强了转移膜的强度和厚度。特别地, 当 0.5 wt% 的 g-C₃N₄ 被填充到热塑性聚酰亚胺(TPI)中时, 在 350 °C 的高温条件下, 实现了极低的磨损率($7.29 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$), 这表明该材料在极端高温环境下具有出色的耐磨性能。

3.2 纤维填料改性

近年来, 有机或无机纤维因其卓越的性能, 被广泛应用于聚酰亚胺、聚醚醚酮、聚苯硫醚等树脂的复合材料制备中, 以制造耐高温的复合材料。纤维增强的聚酰亚胺基工程塑料不仅展现了卓越的耐热性能, 而且在机械性能和摩擦学性能方面也表现优异。目前, 用于改性聚酰亚胺以提高其高温摩擦性能的纤维类润滑剂包括聚对苯撑苯并二噁唑纤维、玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等^[49-54]。这些纤维的加入, 显著提升了聚酰亚胺工程塑料在不同温度下的摩擦性能。纤维填料增强 PI 工程塑料相比于未填充 PI 工程塑料摩擦系数和磨损率在不同温度下的改变程度如图 4 所示。特别是

图 4(b) 中的阴影区域, 清晰地展示了这些纤维对降低聚酰亚胺工程塑料在高温下磨损率的积极影响。接下来, 我们将详细讨论几种纤维改性聚酰亚胺工程塑料在高温条件下的摩擦性能。这些讨论将有助于深入理解不同纤维种类对聚酰亚胺基复合材料性能的具体影响, 以及它们在高温摩擦环境中的潜在应用。

从图 4(a) 可以观察到, 碳纤维(CF)增强的聚酰亚胺(PI)工程塑料的摩擦系数(COF)随着温度的升高呈现出先增加后减少的趋势。这一现象可以归因于碳纤维在高温摩擦过程中产生的闪温, 促使碳纤维发生石墨化转变, 从而有效降低了 PI/CF 复合材料在高温下的摩擦系数。高温下的石墨化现象是显著提高 PI 工程塑料高温摩擦性能的关键因素。Dong 等^[57]通过制备 CF/PI 复合材料, 并与纯聚酰亚胺进行比较, 发现复合材料的热稳定性显著提高。在 150~260 °C 的温度范围内, 复合材料的储能模量比纯聚酰亚胺提高了 40%~52%。特别是在 220 °C 时, CF/PI 和纯 PI 的磨损率分别为 7.72×10^{-6} 和 $6.00 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 表明 CF 的加入使耐磨性提高了 70 倍以上。这些结果表明, 碳纤维是一种有效的改性剂, 能够显著提高聚酰亚胺工程塑料在高温下的耐磨性能。然而, CF 的添加量对聚酰亚胺的摩擦和磨损性能也有显著影响。Dong 等^[59]在研究 CF/PI 复合材料的高温摩擦性能时, 特别关注了 CF 添加量对 PI 高温摩擦性能的影响。研究结果表明, 过低的 CF 填充量难以形成完整的摩擦转移膜, 而过高的 CF 填充量则可能导致复合材料变得脆弱, 容易发生疲劳磨损。当碳纤维含量体积百分比达到 20% 时,

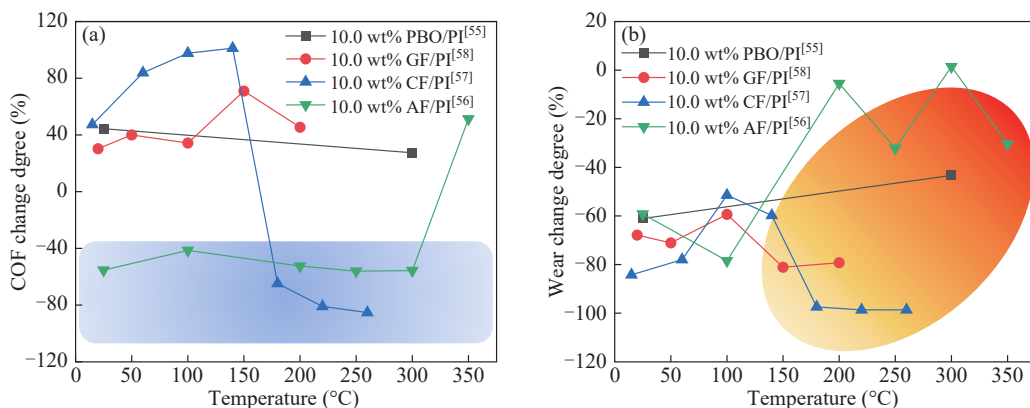


图 4 纤维填料增强聚酰亚胺工程塑料的摩擦性能: (a) 摩擦系数变化程度; (b) 磨损率变化程度

Figure 4 Tribological properties of fiber filler reinforced polyimide engineering plastics: (a) the change degree of friction coefficient; (b) the change degree of wear rate

复合材料在 180 和 260 °C 的温度下分别展现出了最低的摩擦系数 0.054 和 0.100, 这表明适量的 CF 填充是优化复合材料高温摩擦性能的关键。

碳纤维增强的聚酰亚胺复合材料的摩擦磨损机理与温度密切相关。在中温阶段, 聚酰亚胺树脂基体的软化可能导致其与碳纤维的结合性降低。特别是在 140 °C 左右, 裸露的碳纤维可能会遭受破坏或被拔出, 引发较为严重的“三体”磨损现象。由于碳纤维的低表面惰性和非极性特性, 其与聚酰亚胺的界面相容性较差, 因此在 140 °C 以下的温度范围内, 碳纤维的存在可能会导致聚酰亚胺的摩擦系数升高。董凤霞等^[60]研究了稀土溶液改性碳纤维增强聚酰亚胺复合材料。研究表明, 稀土溶液不仅能够对碳纤维表面进行刻蚀, 增加树脂与纤维之间的机械嵌合, 还能提高纤维表面活性基团的数量, 从而增强碳纤维表面的极性, 提升其与 PI 树脂的结合能力。在高温阶段, 易于石墨化的碳纤维能够在对偶面上形成转移膜, 而转移膜的形貌和均匀性是决定复合材料高温下摩擦性能的关键因素。周良等^[61]近期的研究进一步探究了高温下碳纤维织物对聚酰亚胺摩擦性能的影响。通过对摩擦膜进行 SEM 和 XPS 分析, 发现在高温摩擦条件下, 碳纤维增强的聚酰亚胺能够形成更稳定且均匀的摩擦膜结构, 从而有效降低摩擦系数和磨损率。玻璃纤维 (GF) 和碳纤维均展现出良好的热稳定性, 在摩擦实验中能够承受大部分载荷, 有助于提升聚酰亚胺树脂基体的高温摩擦性能。然而, 由于玻璃纤维的强度和模量低于碳纤维, 且在高温下不具备石墨化现象, 因此在选择聚酰亚胺高温摩擦性能的无机纤维改性剂时, 碳纤维通常是更优的选择。

芳纶纤维由于其较低的弯曲、剪切和压缩强度, 与树脂的结合能力较弱, 缺乏表面化学活性, 通常在空气中的长期使用温度限制在 150 °C^[58]。周良等^[61]的研究发现, 在低于 150 °C 的温度下, 芳纶纤维增强的聚酰亚胺 (AF-PI) 与 GCr15 对磨后, 能够在对偶面上形成均匀稳定的摩擦膜, 展现出优于碳纤维增强聚酰亚胺 (CF-PI) 的摩擦性能。然而, 当温度升至 200 °C 时, AF-PI 由于力学性能较差而易被磨穿, 同时伴随着摩擦氧化反应的发生, 此时 CF-PI 的摩擦性能优于 AF-PI。因此, 芳纶纤维更适宜于相对温和的工作条件。为了开发能

够在宽温域下应用的芳纶纤维增强聚酰亚胺耐磨材料, 纳米粒子的引入可以与芳纶纤维产生协同效应, 从而改善聚酰亚胺的高温摩擦性能。Duan 等^[56]制备了芳纶浆粕 (APs)、石墨与 g-C₃N₄ 协同改性增强的聚酰亚胺复合材料 (APs-TPI), 并对其高温摩擦磨损行为进行了研究。研究表明, 在室温至 300 °C 的范围内, 芳纶浆粕 (APs)、石墨与 g-C₃N₄ 的协同作用有效降低了聚酰亚胺的摩擦系数, 显著拓宽了聚酰亚胺工程塑料的应用范围。甚至在 350 °C 的高温下, APs-TPI 复合材料仍能展现出极低的磨损率 ($8.78 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$), 这表明该材料在极端高温环境下具有出色的耐磨性能。

相较于碳纤维和芳纶纤维, 聚对苯撑苯并二噁唑纤维 (PBO) 因其卓越的能量吸收和抗振动力, 展现出更优异的性能。PBO 增强聚酰亚胺复合材料的摩擦学性能不仅受纤维和树脂基体性能的影响, 还与 PBO 纤维与聚酰亚胺 (PI) 的界面相容性密切相关^[62]。如图 4(a) 所示, PBO 纤维的引入使得聚酰亚胺基体在室温和 300 °C 下的摩擦系数均有所提高。为了提高 PBO 纤维与聚酰亚胺基体的黏合程度, 通常会采用物理或化学方法对纤维表面进行修饰。物理方法包括等离子体处理、电晕放电和辐照处理; 化学方法则涵盖酸蚀、偶联剂处理和化学接枝等^[63,64]。Yan 等^[55]通过将二硫化钼 (MoS₂) 化学接枝到 PBO 纤维上, 制备了聚酰亚胺基复合材料。MoS₂ 接枝后的 PBO 纤维在基体中展现出更高的分散性和黏着力, 尤其在高温条件下, PBO 纤维与 MoS₂ 的协同润滑作用显著, 且混合物的高强度有助于阻止聚合物基体的软化变形, 从而有效提升复合材料的高温摩擦性能。当 MoS₂ 与 PBO 的质量比为 1:1 时, 作为增强剂的组合能够发挥最佳的协同效应, 使得复合材料在 300 °C 时的摩擦系数降至 0.370。Yu 等^[65]采用 3-氨丙基三乙氧基硅烷 (APTES) 和镧 (La) 盐对 PBO/PI 复合材料进行表面改性, 并研究了其在 130 和 260 °C 下的摩擦磨损行为。研究表明, 经过表面改性的 PBO 纤维增加了含氧反应官能团, 从而提高了复合材料的界面相容性。在高温条件下, 这种改性有助于更有效地传递载荷, 抑制聚酰亚胺的大面积剥离, 减少复合材料的疲劳磨损和黏着磨损, 进而显著提高复合材料的高温摩擦学性能。

3.3 其他填料改性

为了拓宽聚酰亚胺耐磨材料的应用场景, 除

了之前讨论的填料外,还有多种固体润滑剂可以作为改性聚酰亚胺高温摩擦性能的添加剂。这些固体润滑剂包括石墨颗粒、二氧化硅、软金属和碳纳米管等,它们因其独特的物理化学特性,对改善聚酰亚胺的高温摩擦和磨损性能起着关键作用。

石墨是聚酰亚胺材料常见的固体润滑剂,在杜邦的SP系列和赢创的P84系列等高性能聚酰亚胺材料中,石墨的添加显著提升了材料的耐磨性和热稳定性,Samyn^[66]在研究中也证明了石墨增强的聚酰亚胺复合材料在高温下也有优良的耐磨性能。2022年,Xue等^[67]将膨胀石墨(EG)引入聚酰亚胺(PI)和聚醚砜(PES)混合物中,得到了一种宽温域下的耐磨材料。复合材料出色的高温耐磨性来自膨胀石墨颗粒的多孔微观结构和出色的润滑特性。7.0 wt%EG/PES/PI 复合材料在200 °C下表现出最佳的摩擦和磨损性能,摩擦系数为0.230,磨损率为 $5.68 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

在耐磨材料的开发中,为了应对复杂多变的工作场景,研究人员经常引入特殊的填料以提升材料的综合性能。Ma等^[68]通过将介孔二氧化硅(MPS)作为聚酰亚胺(PI)的固体润滑剂,研究了在不同载荷下PI/MPS纳米复合材料与GCr15钢的干滑动摩擦和磨损行为。研究发现,在高温条件下,尽管较高载荷可能导致PI/MPS纳米复合材料的耐磨性略有下降,但在较低载荷下,该复合材料展现出了优异的高温摩擦性能。这表明通过合理选择和使用固体润滑剂,可以显著提高聚酰亚胺材料在高温环境下的耐磨性和摩擦性能,从而拓宽其应用范围。

银和钼是柔软且具有延展性的固体润滑剂,Duan等^[69]通过热压成型方法制备了Ag-Mo杂化物增强聚酰亚胺复合材料,并在空气环境中研究了不同温度下Ag-Mo杂化物增强PI复合材料的摩擦磨损性能。结果表明,在高温下复合材料表面下形成了夹有Ag-Mo杂化物的三明治状摩擦膜,复合材料的摩擦和磨损行为是通过去除和补充Ag-Mo杂化物形成的摩擦膜来平衡。

碳纳米管(CNTs)作为一种新型的纳米级填料,其独特的结构和性能为复合材料的改性提供了全新的选择。在聚酰亚胺(PI)高温涂层的制备过程中,多壁碳纳米管的添加不仅能够在摩擦过程中促进有机-无机结构的形成,而且还能显著增强复合材料的机械性能,减少涂层在高温下的热分解,从而极大提升材料的耐磨性^[70]。此外,碳纳米管与其他填料如聚酰亚胺纤维、碳纤维、WS₂、SiO₂、Cu等的协同作用,为聚酰亚胺的高温摩擦性能改性提供了更为广阔的应用前景^[22,71,72]。碳纳米管与这些填料之间的机械互锁和分子吸附作用机制,使得它们能够在复合材料中牢固地结合,形成更加稳定的转移膜,从而确保了材料在高温摩擦环境下的优异性能。

二维材料、纤维填料及其他填料通过降低摩擦系数、增强机械性能和形成稳定摩擦膜等机制,显著提升了聚酰亚胺工程塑料的高温摩擦和磨损性能,使其在高温环境下展现出优异的摩擦性能。不同的固体润滑填料使得聚酰亚胺在不同温度区间能保持良好的性能,图5是固体润滑填料增强聚酰亚胺工程塑料的有效温度范围示意图。

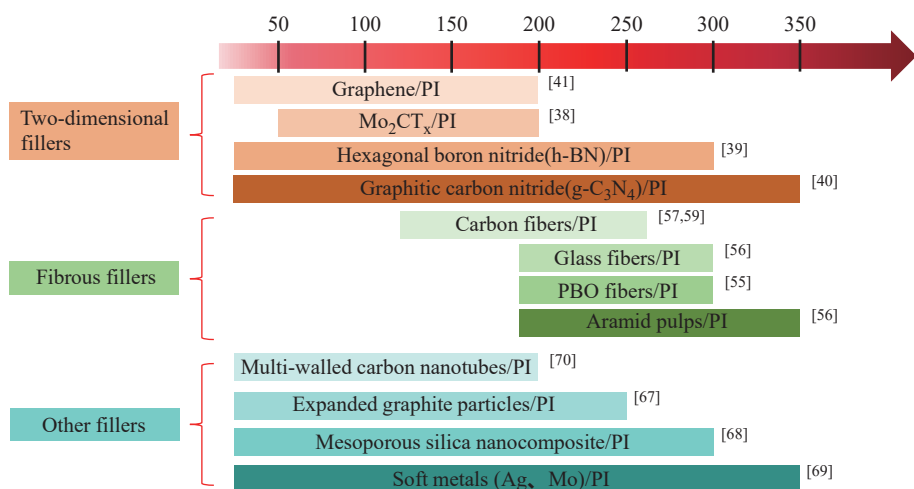


图5 固体润滑填料增强聚酰亚胺工程塑料的有效温度范围示意图

Figure 5 Schematic diagram of the effective temperature range of solid lubricating fillers reinforced polyimide engineering plastics

4 总结与展望

本文详细介绍了聚酰亚胺作为工程塑料的不同成型工艺和它在高温摩擦材料中的应用。涵盖了热模压成型、直接成型、等静压成型、烘涂成型等几种常见的制备方法,并通过具体示意图解释了每种方法的操作步骤和特点。此外,还讨论了聚酰亚胺的化学结构、柔性、分子量、极性等因素对其摩擦性能的影响,尤其是在高温环境下的表现。研究中还提到一些二维材料(如氮化硼、MXenes、石墨烯)和纤维填料(有机和无机纤维)被用作聚酰亚胺增强材料,进一步改善其在高温摩擦下的性能。特别分析了聚酰亚胺的耐高温摩擦性能在不同条件下的变化,指出不同成分、分子结构的聚酰亚胺材料表现出截然不同的摩擦行为。

我们认为,未来的研究应当着重于优化聚酰亚胺的分子结构设计,以提升其高温稳定性与耐磨性;开发多功能纳米填料,探讨填料间的协同效应,进一步提升材料综合性能;建立聚酰亚胺分子结构与耐高温填料选择的适配和对应关系。除此之外,还需深入研究高温摩擦界面的微观机理与化学反应过程;评估材料在长时间高温摩擦下的耐久性与可靠性;改善纤维增强复合材料的界面结合;探索绿色制备工艺,降低能耗与环境影响;开发具备自润滑、自修复功能的新型聚酰亚胺材料,以应对更苛刻的应用环境。

参考文献

- 1 Zhu, S. Y.; Cheng, J.; Qiao, Z. H.; Yang, J. High temperature solid-lubricating materials: a review. *Tribol. Int.*, **2019**, 133, 206–223.
- 2 Li, C.; Feng, Q. Y.; Hong, Y. P.; Gao, L. X.; Guo, X. M.; Xue, W. Z.; Xiong, J. J. Wireless LC conformal temperature sensor based on Ag film (9912-K FL) for bearing temperature measurement. *Nanomaterials*, **2022**, 12(17), 2899.
- 3 杨士勇, 范琳, 冀棉, 胡爱军, 杨海霞, 刘金刚, 何民辉. 耐高温聚酰亚胺材料研究进展. *高分子通报*, **2011**, (10), 70–78.
- 4 Chen, S.; Li, J.; Wei, L.; Jin, Y. L.; Shang, H. F.; Hua, M.; Duan, H. T. Tribological properties of polyimide-modified UHMWPE for bushing materials of seawater lubricated sliding bearings. *Tribol. Int.*, **2017**, 115, 470–476.
- 5 Yan, J.; Zhang, X.; Wang, Y. Review of tribological properties of polyimide-based composite materials. *Ind. Lubr. Tribol.*, **2023**, 75(8), 883–894.
- 6 Wan, C. X.; Zhan, S. P.; Jia, D.; Yang, T.; Chen, H.; Yao, C. Y.; Duan, H. T. Tribological behavior of nanographite/polyimide composite under dry sliding condition. *Wear*, **2022**, 494, 204271.
- 7 Samyn, P.; de Baets, P.; Vancraenenbroeck, J.; Verpoort, F. Postmortem Raman spectroscopy explaining friction and wear behavior of sintered polyimide at high temperature. *J. Mater. Eng. Perform.*, **2006**, 15(6), 750–757.
- 8 Torres, H.; Rodríguez Ripoll, M.; Prakash, B. Tribological behaviour of self-lubricating materials at high temperatures. *Int. Mater. Rev.*, **2018**, 63(5), 309–340.
- 9 Allam, I. M. Solid lubricants for applications at elevated temperatures: a review. *J. Mater. Sci.*, **1991**, 26(15), 3977–3984.
- 10 Wang, Y. M.; Tao, L. M.; Wang, T. M.; Wang, Q. H. Influence of monomer conformation on the mechanical and tribological properties of thermosetting polyimides. *RSC Adv.*, **2015**, 5(123), 101533–101543.
- 11 Duan, C. J.; Yang, Z. H.; Zhang, D.; Tao, L. M.; Wang, Q. H.; Wang, T. M. Effect of isomerism on mechanical and tribological properties of thermoplastic polyimide films. *Tribol. Int.*, **2018**, 121, 373–380.
- 12 Yin, Y.; Song, J.; Zhao, G.; Ding, Q. Improving the high temperature tribology of polyimide by molecular structure design and grafting POSS. *Polym Adv Technol*, **2022**, 33(3), 886–896.
- 13 Wang, X. R.; Chen, G. J.; Huang, Y. F.; Ma, Z. Q.; Yin, X.; Chai, C. P. Tribological behavior and mechanism of Mo₂Ti₂C₃/polyimide composite films under dry friction condition. *Polym. Compos.*, **2024**, 45(9), 7979–7990.
- 14 Wan, C. X.; Jia, D.; Zhan, S. P.; Zhang, W. L.; Yang, T.; Li, Y. H.; Li, J.; Duan, H. T. Property investigation for high-performance polyimides fabricated via compression molding in solid-like state. *High Perform. Polym.*, **2023**, 35(5), 508–518.
- 15 Aizawa, T.; Miyata, T.; Endoh, K. Two-step PM procedure for fabrication of super-engineering plastic gears. *Machines*, **2024**, 12(3), 174.
- 16 Liu, H. M.; Wang, X. D.; Antwi-Afari, M. F.; Mi, H. Y.; Liu, C. T. A state-of-the-art review of polyimide foams research. *Constr. Build. Mater.*, **2024**, 437, 136961.
- 17 Gateman, S. M.; Ahmad Alidokht, S.; Mena-Morcillo, E.; Schulz, R.; Chromik, R. R.; Kietzig, A. M.; Parkin, I. P.; Mauzeroll, J. Wear resistant solid lubricating coatings via compression molding and thermal spraying technologies. *Surf. Coat. Technol.*, **2021**, 426, 127790.
- 18 Hu, R. B.; Chen, Y. M.; Zhang, C. M.; Jiang, S. H.; Hou,

- H. Q.; Duan, G. G. Porous monoliths from polyimide: synthesis, modifications and applications. *Prog. Mater. Sci.*, **2024**, 144, 101284.
- 19 Jin, S. W.; Choi, Y. J.; Yu, H. C.; Lee, S. H.; Jin, Y. J.; Lee, I. S.; Lee, H. S.; Chung, C. M. Preparation of polyimide powders *via* hydrothermal polymerization and post-heat treatment for application to compression-molding materials. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2022**, 10(5), 1910–1919.
- 20 Xu, M. K.; Guo, L. H.; Ruan, H. W.; Zhou, N. N.; Yang, L. J.; Wang, C.; Wang, T. M.; Qing, T.; Zhang, J. Y.; Wang, Q. H.; Fu, Y. Z.; Tao, L. M. Design and pore properties tuning of two-scale porous polyimide fabricated by isostatic pressing for improving oil storage and tribological properties. *Adv. Eng. Mater.*, **2023**, 25(8), 2201421.
- 21 姜卓钰, 张朋, 包建文, 王克俭. 线性聚酰亚胺粉末冷等静压成型模拟及验证. *宇航材料工艺*, **2017**, 47(6), 25–28.
- 22 Zhao, D. Y.; Liu, S. S.; He, J.; Zhao, Z. H.; Yin, S. H. Tribological performance of WS₂/PAI composite coating reinforced with carbon nanotubes-carbon fiber at high temperatures. *Polym. Compos.*, **2024**, 45(8), 7164–7177.
- 23 Demian, C.; Liao, H. L.; Lachat, R.; Costil, S. Investigation of surface properties and mechanical and tribological behaviors of polyimide based composite coatings. *Surface Coat. Technol.*, **2013**, 235, 603–610.
- 24 Samyn, P.; Quintelier, J.; de Baets, P.; Schoukens, G. Characterisation of polyimides under high-temperature sliding. *Mater. Lett.*, **2005**, 59(22), 2850–2857.
- 25 Wang, Y. M.; Wang, T. M.; Wang, Q. H. Effect of molecular weight on tribological properties of thermosetting polyimide under high temperature. *Tribol. Int.*, **2014**, 78, 47–59.
- 26 段春俭, 邵明超, 李宋, 张新瑞, 王超, 王齐华, 王廷梅. 极端条件下的聚酰亚胺自润滑复合材料的研究进展. *中国科学: 化学*, **2018**, 48(12), 1561–1567.
- 27 丛培红, 李同生, 刘旭军, 张绪寿, 薛群基, 李家泽. 温度对线性和交联聚酰亚胺摩擦磨损性能的影响. *高分子学报*, **1998**, (5), 556–561.
- 28 Vaganov, G.; Simonova, M.; Romasheva, M.; Didenko, A.; Popova, E.; Ivan'kova, E.; Kamalov, A.; Elovkovskiy, V.; Vaganov, V.; Filippov, A.; Yudin, V. Influence of molecular weight on thermal and mechanical properties of carbon-fiber-reinforced plastics based on thermoplastic partially crystalline polyimide. *Polymers*, **2023**, 15(13), 2922.
- 29 Yan, J. Y.; Wu, C. X.; Liu, Y. X.; Shen, W. F.; Zhang, X. L.; Li, P.; Wang, G. S.; Wang, Z. H.; Che, H. W.; Wang, Y. M. Synergetic enhancement of wear resistance of polyimide coatings through the integration of MoS₂ nanoflowers and MXene nanosheets. *Wear*, **2024**, 558, 205584.
- 30 Wang, H. Y.; Huang, Q. R.; Liu, C.; Hong, W.; Li, J. N.; Ma, J. J.; Yu, P.; Wang, C. Y.; Yan, X. Z. Development of fluorenyl-based copolyimines with adjustable mechanical properties, recyclability and friction resistance. *Chem. Eur. J.*, **2024**, 30(43), e202401481.
- 31 段春俭, 崔宇, 王超, 陶立明, 王齐华, 谢海, 王廷梅. 高温条件下热固性聚酰亚胺摩擦学性能研究. *摩擦学学报*, **2017**, 37(6), 717–724.
- 32 Panin, S. V.; Luo, J.; Buslovich, D. G.; Alexenko, V. O.; Kornienko, L. A. Effect of the matrix structure on the tribological properties of solid-lubricant composites based on high-temperature polyimide thermoplastics. *Russ. Phys. J.*, **2022**, 65(3), 526–534.
- 33 Su, L. M.; Tao, L. M.; Wang, T. M.; Wang, Q. H. Tribological behavior of fluorinated and nonfluorinated polyimide films. *J. Macromol. Sci. Part B*, **2012**, 51(11), 2222–2231.
- 34 Tian, J. S.; Wang, H. Y.; Huang, Z. Y.; Lu, R. G.; Cong, P. H.; Liu, X. J.; Li, T. S. Investigation on tribological properties of fluorinated polyimide. *J. Macromol. Sci. Part B*, **2010**, 49(4), 791–801.
- 35 Li, T. S.; Tian, J.; Huang, T.; Huang, Z. Y.; Wang, H. Y.; Lu, R. G.; Cong, P. Tribological behaviors of fluorinated polyimides at different temperatures. *J. Macromol. Sci. Part B*, **2012**, 50, 860–870.
- 36 Hu, C.; Qi, H. M.; Song, J. F.; Zhao, G.; Yu, J. X.; Zhang, Y. F.; He, H. T.; Lai, J. P. Exploration on the tribological mechanisms of polyimide with different molecular structures in different temperatures. *Appl. Surf. Sci.*, **2021**, 560, 150051.
- 37 Ronchi, R. M.; de Lemos, H. G.; Nishihara, R. K.; di Vernieri Cuppari, M. G.; Santos, S. F. Tribology of polymer-based nanocomposites reinforced with 2D materials. *Mater. Today Commun.*, **2023**, 34, 105397.
- 38 Li, H. N.; Wang, L. B.; Li, L.; Li, H.; Dai, Y. H.; Hu, Q. K.; Zhou, A. G.; Liu, X. Q. 2D Mo₂CT_x reinforced polyimide nanocomposites for enhancement of surface tribological performance at elevated temperatures. *Adv. Mater. Interfaces*, **2023**, 10(7), 2201563.
- 39 De Oliveira, P. R.; Sukumaran, A. K.; Benedetti, L.; John, D.; Stephens, K.; Chu, S. H.; Park, C.; Agarwal, A. Novel polyimide-hexagonal boron nitride nanocomposites for synergistic improvement in tribological and radiation shielding properties. *Tribol. Int.*, **2023**, 189, 108936.
- 40 Duan, C. J.; Yuan, D. M.; Yang, Z. H.; Li, S.; Tao, L. M.; Wang, Q. H.; Wang, T. M. High wear-resistant performance of thermosetting polyimide reinforced

- by graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) under high temperature. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2018**, 113, 200–208.
- 41 Roy, A.; Mu, L. W.; Shi, Y. J. Tribological properties of polyimide-graphene composite coatings at elevated temperatures. *Prog. Org. Coat.*, **2020**, 142, 105602.
- 42 Bobby, S.; Samad, M. A. Enhancement of tribological performance of epoxy bulk composites and composite coatings using micro/nano fillers: a review. *Polym. Adv. Technol.*, **2017**, 28(6), 633–644.
- 43 Guerra, V.; Wan, C. Y.; McNally, T. Thermal conductivity of 2D nano-structured boron nitride (BN) and its composites with polymers. *Prog. Mater. Sci.*, **2019**, 100, 170–186.
- 44 Li, M. J.; Yang, J. J.; Ma, S. Q.; Liu, G.; Yang, H. R.; Yao, J. N. Effect of h-BN and nano-SiO₂ fillers on the high-temperature tribological properties of PEEK/PI-based composites. *Lubricants*, **2023**, 11(10), 416.
- 45 Wyatt, B. C.; Rosenkranz, A.; Anasori, B. 2D MXenes: tunable mechanical and tribological properties. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(17), 2007973.
- 46 Parra-Muñoz, N.; Soler, M.; Rosenkranz, A. Covalent functionalization of MXenes for tribological purposes—a critical review. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2022**, 309, 102792.
- 47 Grützmacher, P. G.; Suarez, S.; Tolosa, A.; Gachot, C.; Song, G.; Wang, B.; Presser, V.; Mücklich, F.; Anasori, B.; Rosenkranz, A. Superior wear-resistance of Ti₃C₂T_x multilayer coatings. *ACS Nano*, **2021**, 15(5), 8216–8224.
- 48 Zhou, L.; Qi, H. M.; Lei, Y.; Yu, J. X.; Guo, B. G.; Zhang, D. Ti₃C₂ MXene induced high tribological performance of polyimide/polyurea copolymer at a wide temperature range. *Appl. Surf. Sci.*, **2023**, 608, 155157.
- 49 Mor, M.; Meiser, M.; Langhof, N.; Vinci, A.; Failla, S.; Alber-Laukant, B.; Tremmel, S.; Schafföner, S.; Sciti, D. Tribological behavior of carbon fiber reinforced ZrB₂ based ultra high temperature ceramics. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **2023**, 43(13), 5413–5424.
- 50 高阳, 刘思思, 廖君慧, 刘春荣, 刘金刚. 碳纤维-MoS₂复合涂层的高温摩擦学性能研究. *润滑与密封*, **2022**, 47(11), 10–16.
- 51 Sudheendra, K.; Vinodhini, J.; Govindaraju, M.; Bhowmik, S. Comparative studies of nitrogen plasma and argon plasma treatment on the strength of PBO fibre reinforced high-temperature resistant thermoplastic composite. *High Perform. Polym.*, **2021**, 33(7), 729–740.
- 52 Yan, Y. F.; Meng, Z. J.; Liu, H.; Wang, J. Z.; Chen, B. B.; Yan, F. Y. Nano-MoS₂ modified PBO fiber hybrid for improving the tribological behavior and thermal stability of TPI/PEEK blends. *Tribol. Int.*, **2020**, 144, 106117.
- 53 Lu, G. F.; Liu, H. M.; Qi, X. W.; Dong, Y.; Fan, B. L.; Zhang, Y.; Yao, W. G. Multiscale insight to tribological mechanism of PTFE/aramid fiber composite liner containing PES/PMPS microcapsules under a high temperature environment. *Tribol. Int.*, **2024**, 192, 109315.
- 54 Huang, R.; Ma, S.; Zhang, M.; Yang, J.; Wang, D.; Zhang, L.; Xu, J. Wear evolution of the glass fiber-reinforced PTFE under dry sliding and elevated temperature. *Mater. Basel Switz.*, **2019**, 12(7), E1082.
- 55 Yan, Y. F.; Meng, Z. J.; Wang, J. Z.; Yan, F. Y. The effect of different grafting extent of PBO-MoS₂ hybrids on the tribological performance of TPI-based composites at high temperatures. *Polym. Adv. Technol.*, **2021**, 32(5), 2030–2041.
- 56 Duan, C. J.; Gao, C. P.; Li, S.; Yang, R.; Yang, Z. H.; Zhang, Y. M.; Tao, L. M.; Zhang, X. R.; Wang, Q. H.; Wang, T. M. Tailoring polyimide composites with low friction and wear at high temperatures. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2022**, 139(9), 51736.
- 57 Dong, F. X.; Hou, G. L.; Cao, F. X.; Yan, F. Y.; Liu, L.; Wang, J. Z. The lubricity and reinforcement of carbon fibers in polyimide at high temperatures. *Tribol. Int.*, **2016**, 101, 291–300.
- 58 Zhao, G.; Hussainova, I.; Antonov, M.; Wang, Q. H.; Wang, T. M.; Yung, D. L. Effect of temperature on sliding and erosive wear of fiber reinforced polyimide hybrids. *Tribol. Int.*, **2015**, 82, 525–533.
- 59 Dong, F. X.; Hou, G. L.; Liu, H.; Liu, L.; Cao, F. X.; Wang, J. Z.; Yan, F. Y. An investigation on the mechanical and tribological properties of carbon fiber/polyimide composites at elevated temperatures. *Polym. Compos.*, **2018**, 39(S2), E869–E882.
- 60 董凤霞, 侯国梁, 刘亮, 曹凤香, 刘昊, 阎逢元. 稀土改性对碳纤维增强聚酰亚胺复合材料在不同温度下摩擦学性能的影响. *摩擦学学报*, **2017**, 37(2), 148–154.
- 61 周良, 雷洋, 余家欣, 郭宝刚, 齐慧敏. 宽温域环境下不同纤维织物/聚酰亚胺复合材料的摩擦学性能研究. *表面技术*, **2023**, 51(12), 91–100.
- 62 Yu, L.; He, R.; Zhang, Y. J.; Gao, J. C. Effect of surface treatment on flexural and tribological properties of poly(*p*-phenylene benzobisoxazole)/polyimide composites under normal and elevated temperature. *Materials*, **2018**, 11(11), 2131.
- 63 Liu, Q.; Meng, Z. R.; Chen, X. D.; Xiao, Z. X.; Peng, X. Y. Latest research progress in modification technologies of PBO fibers. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2023**, 2460(1), 012084.
- 64 Wang, Y. L.; Zhang, Z. Z.; Liu, M.; He, Y. H.; Li, P. L.;

- Yuan, J. Y.; Yang, M. M. Effects of rod-like attapulgite and lamellar Kaolin reinforcement on the tribological behavior of PBO textile-resin composite liner. *Tribol. Int.*, **2022**, 174, 107689.
- 65 Yu, L.; Zhang, Y. J.; Tang, J. M.; Gao, J. C. Friction and wear behavior of polyimide composites reinforced by surface-modified poly-*p*-phenylenebenzobisoxazole (PBO) fibers in high ambient temperatures. *Polymers*, **2019**, 11(11), 1805.
- 66 Samyn, P.; Schoukens, G. The lubricity of graphite flake inclusions in sintered polyimides affected by chemical reactions at high temperatures. *Carbon*, **2008**, 46(7), 1072–1084.
- 67 Xue, Y. H.; Yan, S. C.; Chen, Y. Thermomechanical and tribological properties of polyimide and polyethersulfone blends reinforced with expanded graphite particles at various elevated temperatures. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2022**, 139(28), e52512.
- 68 Ma, J.; Qi, X. W.; Zhao, Y. L.; Zhang, Q. L.; Yang, Y. L. Effects of elevated temperature on tribological behavior of polyimide and polyimide/mesoporous silica nanocomposite in dry sliding against GCr15 steel. *Wear*, **2017**, 374, 142–151.
- 69 Duan, C. J.; He, R.; Li, S.; Shao, M. C.; Yang, R.; Tao, L. M.; Wang, C.; Yuan, P.; Wang, T. M.; Wang, Q. H. Exploring the friction and wear behaviors of Ag-Mo hybrid modified thermosetting polyimide composites at high temperature. *Friction*, **2020**, 8(5), 893–904.
- 70 Roy, A.; Mu, L. W.; Shi, Y. J. Tribological properties of polyimide coating filled with carbon nanotube at elevated temperatures. *Polym. Compos.*, **2020**, 41(7), 2652–2661.
- 71 Qi, H. M.; Lei, Y.; Yu, J. X.; Zhao, G.; Guo, B. G.; Zhou, L.; Zhang, D. Role of fullerene carbon on tribological performance of polyimide composites at a large temperature span. *Tribol. Int.*, **2022**, 173, 107628.
- 72 Yan, Y. F.; Zhang, B. B.; Wang, J. Z.; Cao, C. H.; Yan, F. Y. MWCNT—polyimide fiber-reinforced composite for high-temperature tribological applications. *Coatings*, **2024**, 14(2), 181.