

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.026

PEEK改性研究进展及其应用

曾献杰¹, 张向龙², 邱新媛¹, 陈青¹, 杨啸¹

(1. 中国核动力研究设计院, 中国核动力研究设计院核反应堆技术全国重点实验室, 成都 610213; 2. 海装西安局, 西安 710000)

摘要:介绍了聚醚醚酮(PEEK)作为半结晶型热塑性工程塑料的固有优势,简述了PEEK的化学改性、纤维增强改性、填料填充改性和有机共混改性等主要改性方法及存在的技术难点,以及上述改性方法对材料力学、热学以及电学等基本性能的影响。回顾了PEEK及其改性材料在航空航天领域、汽车工业领域、电子信息领域、新能源领域以及生物医学领域中的应用现状。并指出化学改性需关注改性条件的温和性和高效性,纤维增强改性需优化纤维与基体之间的界面结合力,填料填充改性需提升填料在基体中的分散均匀性,有机共混改性需解决两相之间的共混相容性问题。单一改性方法可以提升材料某一方面的性能,但往往又会造成其他性能的明显下降。未来应结合仿真模拟等分析设计手段,探索PEEK材料协同改性方法以提高材料的综合性能,从而进一步拓宽PEEK及其改性材料的应用场景。

关键词:PEEK; 改性进展; 性能提升; 改性方向; 应用领域

中图分类号:TQ322.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)04-0224-07

Modification research progress and application of polyetheretherketone

ZENG Xianjie¹, ZHANG Xianglong², QIU Xinyuan¹, CHEN Qing¹, YANG Xiao¹

(1. Nuclear Power Institute of China, National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Chengdu 610213, China;

2. Haizhuang Xi'an Bureau, Xi'an 710000, China)

Abstract : The inherent advantages of polyetheretherketone (PEEK) as a semi crystalline thermoplastic engineering plastic were introduced. The main modification methods and technical difficulties of PEEK were briefly described, such as chemical modification, fiber-reinforced modification, filler filling modification and organic blending modification, as well as their effects on the mechanical, thermal, and electrical properties of the material. The application status of PEEK and its modified materials in aerospace, automotive industry, electronic information, new energy and biomedical fields was reviewed. It was pointed out that chemical modification needs to focus on the mildness and efficiency of modification conditions, fiber reinforcement modification needs to optimize the interfacial bonding force between fibers and matrix, filler filling modification needs to improve the dispersion uniformity of fillers in matrix and organic blending modification needs to solve the compatibility problem between two phases. A single modification method can improve one aspect of a material's performance, but often leads to a significant decrease in other properties. In the future, analysis and design methods such as simulation should be combined to explore collaborative modification methods of PEEK materials to improve their comprehensive performance, thereby further expanding the application scenarios of PEEK and its modified materials.

Keywords : polyetheretherketone ; progress in modification ; performance improvement ; modification direction ; application field

随着科技水平的快速发展和提升,工业领域迫切需要高性能材料以满足经济社会的发展需求。而高分子复合材料

因具有独特的性能优势受到了广泛的关注和研究。聚芳醚酮(PAEK)作为一类新型工程塑料,是由芳基、醚键以及酮基

基金项目: 中核集团青年英才项目(08-2211)

通信作者: 曾献杰,助理研究员,研究方向为反应堆高端装备设计以及核级绝缘密封材料研发

收稿日期: 2026-01-28

引用格式: 曾献杰,张向龙,邱新媛,等.PEEK改性研究进展及其应用[J].工程塑料应用,2026,54(4):224-230.

ZENG Xianjie, ZHANG Xianglong, QIU Xinyuan, et al. Modification research progress and application of polyetheretherketone[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 224-230.

组成的半结晶型热塑性聚合物。PAEK材料具有优异的耐热性、阻燃性、耐辐照性、化学稳定性以及出色的力学性能、电气绝缘性能和加工性能^[1-2],在航空航天、核工业、电子信息以及生物医药等工业领域具有广阔的应用前景^[3]。根据分子链结构的不同,PAEK可分为聚醚酮(PEK)、聚醚醚酮(PEEK)、聚醚酮酮(PEKK)、聚醚醚酮酮(PEEKK)以及聚醚酮醚酮酮(PEKEKK)等^[4]。其中,PEEK是最早实现工业化生产也是目前应用最为广泛的PAEK材料,其玻璃化转变温度(T_g)为143℃、熔点(T_m)为343℃,可在240℃高温环境下长期使用^[5]。

尽管PEEK材料性能优异,但依然存在一定的局限性,例如,纯PEEK树脂具有热变形温度相对较低、剪切性能差、脆性大,高温力学性能以及熔融流动性较差等缺点,这限制了PEEK材料在工业领域的应用^[6]。对PEEK开展改性研究,已成为拓展其应用范围的关键途径。国内外科研人员通过化学或物理手段,将有机或无机组分引入PEEK基体,以此提升材料的力学、热学、电学及加工成型等各项性能,从而满足其在苛刻工况下的应用要求。本文分别介绍了PEEK材料化学改性、纤维增强改性、填料填充改性和有机共混改性的研究进展及存在的技术难点,以及上述改性方法对材料各项基本性能的影响。同时回顾了PEEK及其改性材料在航空航天领域、汽车工业领域、电子信息领域、新能源领域以及生物医学领域中的应用现状。

1 PEEK改性方式

1.1 化学改性

化学改性是指通过引入不同的分子链或具有特定性能的基团来改变聚合物的整体分子结构,以实现增强材料热学、力学等性能的改性方法。PEEK化学改性的主要途径包括改变主链上的醚酮基团比例、主链上引入其它基团、支化交联、引入侧链基团以及共聚改性等^[7-8]。

改变主链上的醚酮基团比例可以调整PEEK材料的耐热性或韧性,通常情况下,醚键的存在可以增强分子链段的柔性,而酮键可以增强分子链段的刚性。提高主链上酮键的百分含量可以增强材料的刚性,从而提高材料的耐热性。PEKK、PEEKK分子链中酮键的含量高于PEEK,其中PEKK的 T_g 为170℃、 T_m 为388℃,PEEKK的 T_g 为166℃、 T_m 为384℃^[9],与PEEK材料相比其 T_g 提高了20℃以上, T_m 提高了40℃以上,材料的热稳定性和高温使用性能得到明显提升。此外,将联苯、金刚烷、萘环、芳杂环等刚性耐热结构单元引入PAEK主链中,可以提高聚合物的耐热性能。例如,王辉等^[10]将刚性金刚烷侧基接枝在PAEK基体中,成功制得高性能PAEK材料。研究发现,金刚烷侧基能够提升聚合物分子间的自由体积,同时增强分子链的刚性,进而有效提高聚合物的 T_g 。

T_g 的提高可以增强聚合物的高温适用性能,但 T_m 的升高会增加聚合物的加工难度。因此在提升聚合物 T_g 的同时,还需兼顾其良好的加工性能。实际应用中,通常借助共聚手段

来精准调控聚合物的 T_g 与 T_m 变化。例如,王汉夫等^[11]合成了联苯含量存在梯度差异的PEEK-PEDEK嵌段共聚物,并系统探究了共聚物的热学性能与结晶行为。结果显示,联苯的引入能够有效提升该聚合物的 T_g ,而聚合物 T_m 则随联苯含量的增加呈先降后升的变化规律,且在联苯含量为20%时,该共聚物出现最低共熔点。与纯PEDEK相比,聚合物的 T_m 得到了有效降低,从而保持了聚合物的加工特性。陈俊俊^[12]采用高耐温性的间位3,5-二羟基苯甲酸作为共聚单体,制备了一COOH含量不同的PEEK-COOH聚合物,并对聚合物的性能进行研究。结果表明,当-COOH含量为10%时,共聚产物的 T_g 为156℃, T_m 达到295℃,热分解温度为460℃,拉伸强度达到了73.7 MPa。相较于纯PEEK树脂,其 T_g 升高了13℃, T_m 下降了39℃,在提升聚合物耐温性能的同时,优化了材料的加工性能。

此外,在PEEK分子主链上接枝侧基,可以利用侧基的空间位阻或相互作用,调整分子链的排列规整特性,从而影响材料的基本性能。例如,磺酸基团、含氟侧基的引入都可以对PAEK的化学性能产生显著影响。马春成等^[13]以氯磺酸为磺化剂,浓硫酸为溶剂,通过PEEK的磺化反应,制备了磺化程度不同的磺化PEEK(SPEEK),并研究了磺化度对SPEEK的结构、热稳定性、结晶行为及质子传导率的影响。研究结果表明,随着磺化度的增加,SPEEK的结晶度显著降低,热稳定性下降,但SPEEK膜具有良好的质子传导性能,磺化度为58%的SPEEK成膜性能优异,其质子传导率为0.05 S/cm,在质子交换膜领域具备较好的应用潜力。氟原子掺入聚合物链中可提高聚合物的溶解度、阻燃特性和热学特性等。Xie等^[14]以氟化双酚、非氟化双酚-苯基对苯二酚和4,4'-二氟二苯甲酮为原料,制备了含氟侧基的PEEK材料,制备的聚合物具有优异的热学特性,其 T_g 范围为148~160℃,且含氟侧基的引入可以提高材料的热分解温度。此外,聚合物好表现出了优异的力学性能和介电性能,拉伸强度为95.2~104.0 MPa,拉伸弹性模量为2.68~3.06 GPa,断裂伸长率为15%~32%,介电常数为2.75~2.95 (1 MHz)。

大量研究表明,化学改性在提升PEEK力学、热学及电学等性能方面具有较大的应用潜力,通过共聚、接枝以及交联等化学改性方法,可以有效调控PEEK的分子结构和表面特性,进而实现提升材料性能指标的目的。然而,化学改性过程中也存在一些问题,首先是化学改性通常需要强酸、强碱或高温条件,容易造成PEEK主链降解,进而影响PEEK的热稳定性和力学完整性;其次是部分改性方法工艺复杂、成本较高,在实现工业中的大规模推广与应用过程中,需解决工艺放大技术难题以及产品经济性问题。针对上述问题,PEEK材料改性的未来研究方向可聚焦于以下几个方面:一是开发更加高效、温和的改性工艺,如采用光催化、等离子体辅助或超临界流体技术,降低对材料本体结构的破坏;二是探索新型高效的功能化改性剂,例如具有协同增强效应的多功能填料和生物基改性剂,以实现力学、热学与电学性能的

协同提升。

1.2 纤维增强改性

纤维增强是PEEK常用的改性方法,旨在通过引入高强度、高模量、良好耐热性和化学稳定性的纤维来改善复合材料的力学性能和热稳定性,用于PAEK增强改性的纤维主要有碳纤维(CF)、玻璃纤维(GF)、芳纶纤维以及各种晶须等^[15-16]。根据纤维形态的不同,又可分为连续纤维增强、短切纤维增强和编织纤维增强。连续纤维增强是通过特定的工艺将长纤维嵌入到PEEK基体中,以增强复合材料的强度、刚度和耐热性等。短切纤维增强是将长纤维切割成短段,然后均匀分散在PEEK基体中,这种方法可以增加复合材料的韧性、抗冲击性和耐磨性。编织纤维增强则是将纤维编织成织物或三维结构,然后与PEEK基体进行复合,这种方法可以提供更好的纤维排列和更高的纤维体积分数,从而进一步提高材料的力学和热学性能。

Li等^[17]制备了短切玻璃纤维(SGF)含量为30%的PEEK复合材料(SGF/PEEK),系统探究了其力学、热学与耐摩擦性能等。结果表明,SGF/PEEK复合材料展现出优异的耐摩擦特性;相较于纯PEEK树脂,复合材料的热分解温度提升75℃,拉伸强度提高了64%,弯曲强度则提高了66%。

贺捷等^[18]基于长玻璃纤维(LGF)和PEEK原材料,采用挤出造粒工艺制备出LGF/PEEK复合材料,并对复合材料的微观形貌、热学性能及力学性能展开测试分析。结果显示,LGF与PEEK基体结合紧密,界面相容性良好;当LGF的质量分数为15%时,相较于纯PEEK树脂,复合材料的热分解温度提升了55℃,力学性能也得到显著改善,具体而言,拉伸强度提高了70%、剪切强度提高了46%、弯曲强度提高了68%。

张照等^[19]采用热压成型工艺,制备出航空用纺织结构CF增强PEEK复合材料。通过对CF开展去浆、活化和表面涂层改性的改性处理,复合材料的层间剪切强度得到显著提升。微观形貌分析结果表明,经界面改性的复合材料,其断裂位置出现在基体内部而非界面处,这表明增强相材料与基体间的结合性能良好。此外,该研究表明热压温度、压力等工艺参数影响复合材料综合力学性能,在优化后的工艺条件下制得的复合材料,其拉伸强度与弯曲强度分别可达714.3 MPa、955.8 MPa。

刘磊等^[20]采用熔融共混的方法,将GF与SiC纤维掺入PEEK基体中,经注塑成型工艺制备复合材料,同时对复合材料的力学性能开展了系统的测试与分析。结果表明,与大直径GF相比,SiC的直径更小,其与PEEK基体的界面相容性更优,从而使得SiC/PEEK材料的力学性能优于GF/PEEK材料,当SiC质量分数为20%时,SiC/PEEK复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量及冲击强度分别为130.4 MPa、7.39 GPa和14.8 kJ/m²,比纯PEEK分别提高了67%、347%和143%。

此外,在纤维增强改性过程中,纤维与基体之间的界面相容性至关重要。采用表面处理、偶联剂等手段可以改善纤

维与PEEK基体之间的界面特性,从而提高材料的综合性能。Hassan等^[21]通过在活化CF上引入PEKK界面层,利用PEKK与活化CF之间的氢键作用,以及PEKK、PEEK两种材料之间的优异相容性,从而改善CF/PEEK材料的纤维-基体界面相容性。研究结果显示,复合材料的层间剪切强度、弯曲强度和模量分别提高了70%、37%和48%,并且这种改性方法易于操作,可用于生产含有连续CF或CF织物的大尺寸复合材料。

为进一步强化纤维增强改性的效果,Li等^[22]通过3D打印制备了SCF/PEEK复合材料,研究了SCF含量和退火处理对SCF/PEEK复合材料力学性能和微观结构的影响。研究结果表明,SCF含量为5%的SCF/PEEK复合材料表现出最佳的力学性能,相较于纯PEEK树脂,该材料的拉伸强度、弯曲强度分别提升34%、24.4%,拉伸弹性模量、弯曲模量则分别提高115%、70%。采用退火处理方式可以进一步提高复合材料的界面强度、结晶面积和降低残余应力,进而使得复合材料的力学性能得到提升,在260℃下退火1 h后,复合材料的拉伸强度、界面剪切强度分别为99.43 MPa、22.94 MPa,较退火处理之前分别提高了20%和9.9%。

PEEK通过纤维增强改性手段在提升其力学性能方面取得了显著成效,然而,纤维、PEEK基体两相之间的界面结合特性仍不够理想,容易导致应力传递效率低、纤维分布不均等问题,影响复合材料的质地均匀性和性能一致性。未来研究方向可重点关注以下几点:一是进一步优化纤维表面处理技术,如通过化学接枝、等离子体处理或涂层改性,提升纤维与PEEK基体之间的界面结合强度;二是发展先进的复合工艺,如原位聚合、反应性注射成型等,以提高纤维分散均匀性和复合效率。

1.3 填料填充改性

PEEK填充改性是一种通过向基体中添加不同种类的填料来改善其性能的方法。无机填料如玻璃微珠、二氧化硅、氧化铝、碳酸钙等^[23],具有高热稳定性、良好的化学稳定性。它们可以作为增强剂添加到PEEK基体中,提高复合材料的硬度、强度和热稳定性等。纳米填料如碳纳米管(CNTs)、纳米二氧化硅、纳米氧化铝、纳米AlN等^[24],具有极高的比表面积和优异的力学、热学性能。它们可以通过纳米效应改善PEEK基体的性能,进而提高复合材料的强度、模量、热稳定性和耐摩擦性能等。

Goyal等^[25]采用溶液共混法和热压法制备了含新型高性能AlN组分的AlN/PEEK复合材料,并对该材料的微观形貌、熔融温度、结晶性能、热稳定性和维氏硬度等进行了表征测试。研究结果显示,AlN与PEEK基体相容性良好,颗粒在基体中实现均匀分散。AlN颗粒在复合材料成型过程中充当成核剂的作用,AlN的加入可以提升复合材料的T_m、结晶温度、结晶度和硬度,与纯PEEK相比,复合材料具有更高的热稳定性。

张振清等^[26]通过熔融共混法将SiO₂和石墨烯纳米片

(GNP)引入 PEEK 基体中制备了复合材料,研究了 SiO_2 和 GNP 对 PEEK 性能的影响。结果表明, SiO_2 在 PEEK 基体中堆积分布,而 GNP 在 PEEK 中形成片状结构; SiO_2 和 GNP 均能增强复合材料的弹性模量和热稳定性;加入 GNP 可以提高 PEEK 复合材料的拉伸强度,而 SiO_2 的加入则会降低拉伸强度。为进一步改善 SiO_2 在 PEEK 中的分散均匀性, Liu 等^[27]在 SCF 上接枝纳米 SiO_2 ,得到的改性填料(SCF- SiO_2)与 PEEK 基体之间具有很强的界面相互作用, SCF- SiO_2 /PEEK 复合材料的力学性能和热稳定性的测试结果表明, SiO_2 接枝后的复合材料拉伸强度、弯曲强度和热分解温度明显优于 SCF/PEEK 复合材料。此外,复合材料的摩擦系数、磨损率相较于未接枝 SiO_2 前分别减小了 56.4%、87.4%。Chen 等^[28]通过球磨超声分散结合熔融挤出注塑,制备了 PEEK/ SiO_2 复合材料和 PEEK/ SiO_2 /氧化石墨烯(GO)复合材料,引入 GO 纳米片作为界面增强剂,以改善 SiO_2 和 PEEK 之间的界面结合性能。力学测试结果表明, SiO_2 和 GO 的加入提升了复合材料的模量、强度和断裂韧性,当 SiO_2 含量为 30% 时, PEEK/ SiO_2 复合材料的拉伸强度、杨氏模量分别约为 95.9 MPa、4.007 GPa,比纯 PEEK 分别提高了 6.4% 和 21.2%,在此基础上再添加含量为 1.5% 的 GO,得到的 PEEK/ SiO_2 /GO 复合材料,其拉伸强度、拉伸弹性模量进一步提高到约 101.5 MPa、4.62 GPa,比纯 PEEK 高 12.6% 和 39.4%。

Ata 等^[29]将 CNTs 加入 PEEK 中制备了 CNTs/PEEK 复合材料,研究结果表明 CNTs 的加入对材料的成型特性没有影响,但可有效提升复合材料拉伸强度、弯曲强度等力学性能,且由于 CNTs 具有抗氧化的功能, CNTs/PEEK 的热阻率有所提高。Jiang 等^[30]采用 4,4'-二氟苯甲酮修饰多壁碳纳米管(MWCNTs),一方面使 MWCNTs 增加耐温官能团,另一方面增强其与 PEEK 的界面相容性。研究表明,通过原位接枝聚合将表面官能化的 MWCNTs(MWCNTs-DB)连接到 PEEK 树脂上可制备高强度 PEEK 纳米复合材料, MWCNTs-DB 在 PEEK 中分散性良好;与纯 PEEK 相比,添加 1% 的 MWCNTs-DB 使复合材料的拉伸与弯曲强度分别提升 28% 和 22%, T_g 提升 5 °C。

Liu 等^[31]采用湿法共混技术制备了 MWCNTs/羟基磷灰石/CF(MWCNT/HA/CF)三元填料,并通过球磨共混技术制备了 MWCNTs/HA/CF/PEEK 复合材料,分析研究了复合材料的力学性能以及表面润湿性。结果表明, MWCNTs 和 HA 可以增强复合材料的亲水性以及提升材料的力学性能,复合材料拉伸强度和压缩强度分别为 123.5 MPa 和 191 MPa,比纯 PEEK 提高了 75.82% 和 25.39%。Lai 等^[32]同样采用 HA 填充改性,制备了 HA/PEEK 纳米复合材料并研究了其热力学性能,结果表明,纳米复合材料的拉伸强度、冲击强度和弯曲强度在 HA 含量为 2.5% 时达到最大值,分别比纯 PEEK 高 18.5%、38.2% 和 5.7%。此外,复合材料的弯曲模量比纯 PEEK 高约 30%,热稳定性也有一定程度的增强。

通过填料填充改性手段可以将无机填料、耐温填料以及

导电填料掺入 PEEK 基体中,以实现提升材料力学、热学及电学等性能的目的。然而,填充改性存在填料与 PEEK 基体之间的界面相容性较差、填料在基体中的分散性不佳、容易发生团聚等问题,导致应力集中和界面滑移,从而影响材料性能的质地均匀性和整体性能的稳定性。未来的改性方向应侧重于研究填料及 PEEK 基体新型表面改性技术(如硅烷偶联剂功能化、等离子体处理、化学接枝等),以增强填料与 PEEK 之间的界面结合;开发低能耗的复合工艺,如原位聚合、熔融共混和静电纺丝等,以提高填料分散均匀性;结合多尺度理论建模与实验研究,深入揭示填料-基体之间相互作用机制及其对性能的影响规律,推动复合材料的高效智能设计。

1.4 有机共混改性

共混改性是将 PEEK 与其他具有特定性能的高分子材料混合以提升复合材料综合性能的改性方法。共混材料的特性及其与 PEEK 材料的界面相容性是影响改性效果关键因素,选择合适的共混材料可以有效改善 PEEK 材料的耐热性、力学性能等^[33]。常见的共混材料有聚醚砜(PES)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚酰亚胺(PI)以及聚醚酰亚胺(PEI)等。

申维新等^[34]采用 PES 制备了 PES/PEEK/连续 CF(CCF)复合材料,研究了 PES 的加入对 PEEK/CCF 复合材料的性能影响规律。性能测试结果表明, PES 不仅提高了 CCF 的分散均匀性,还提高了 CCF 与 PEEK 基体的界面结合力, PES/CCF/PEEK 复合材料具有优异的力学性能。当 PES 的质量分数为 15% 时, PES/CCF/PEEK 材料的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度分别为 236.2 MPa、345.1 MPa、12.3 kJ/m²,与不添加 PES 改性的 CCF/PEEK 相比,拉伸、弯曲以及冲击强度分别提升了 13.69%、21.70% 和 36.97%。

王运良等^[35]通过共混的方式将热塑性 PI 引入 PEEK 中制备了 PI/PEEK 复合材料, PI 含量更高的复合材料在高温段的储能模量有所增加,这表明复合材料的耐热性优于 PEEK。王丽娜^[36]的研究结果同样表明,改性树脂 TPI 的引入可以大幅提升 PEEK 高温段的力学性能,复合材料的拉伸强度及模量随 PI 含量的增加均显著提升,线膨胀系数则呈明显下降趋势。即 PI 的引入可以改善 PEEK 树脂的热稳定性和高温力学性能,增强材料的高温适用性能。

Bai 等^[37]和 Niu 等^[38]通过共混的方法将交联聚醚酰亚胺(c-PEI)掺入 PEEK 基体中制得了 c-PEI/PEEK 复合材料,由于 c-PEI 中的交联网络的构建限制了分子链段在非晶区域的运动,从而有效提高了 c-PEI/PEEK 的耐热性、尺寸稳定性、高温力学性能以及介电性能。当共混物 c-PEI 的含量为 20% 时, c-PEI/PEEK 的 T_g 约为 174 °C,与纯 PEEK 相比分别提升了 18.7%,复合材料的拉伸强度、断裂伸长率也得到了一定程度提升。此外,复合材料的高温介电特性得到明显改善,在 160 °C 和 1 000 Hz 时, c-PEI 含量为 20% 的 c-PEI/PEEK 的介电常数为 3.22,介电损耗为 0.001 9,与室温下的测试值基本相同,共混膜的耗散因数为 0.001 9,仅为纯 PEEK 树脂

的14%。

Wang等^[39]研究了PI有机共混改性对PEEK复合材料界面性能的影响,将PI作为改性剂涂附在SCF表面制备得到SCF-PI,通过SCF-PI掺入PEEK树脂中制备了PI浓度为0~2.0%的PEEK复合材料(SCF-PI/PEEK)。研究表明,PI在SCF表面均匀致密分布,提高了纤维的表面润湿性及其与PEEK之间的界面附着力,与不含PI的SCF/PEEK材料相比,PI含量为1.0%的SCF-PI/PEEK复合材料,其拉伸强度、弯曲强度分别提升16.8%、8.2%,界面剪切强度提升24.8%,从70.1 MPa提高到88.1 MPa。此外,动态力学分析曲线表明,随着PI浓度的增加,SCF-PI/PEEK复合材料的储能模量增强,从而导致复合材料的刚度更高,阻尼行为更低。

PEEK有机共混改性在提升其力学、热学及电学性能方面展现出良好的研究潜力与应用价值,通过与具有良好相容性的有机高分子材料,如与PES、聚苯硫醚(PPS)、聚氨酯(PUR)等共混,可实现材料性能的互补和协同增强。然而,PEEK材料为结晶性高分子,与多数无定形有机聚合物在热力学上存在相分离倾向,导致共混体系相容性较差,影响性能均匀性和稳定性;此外,关于共混体系中微观相结构调控与性能演变之间的系统性研究仍不完善,共混体系中各组分之间的相互作用机理有待进一步深入研究。未来的改性研究方向应着重于以下几个方面:一是开发新型反应性相容剂或采用功能化共混策略,以改善PEEK与其他聚合物之间的共混相容性;二是结合计算模拟与先进表征技术(如原子力显微镜、小角X射线散射等),揭示共混体系中相结构演化与性能之间的内在机理,进而为材料设计提供理论指导。

2 PEEK应用研究

2.1 航空航天领域

随着航空航天技术持续发展,飞行器的实际作业环境越发严酷,对材料性能的要求也随之不断提高。PEEK及其复合材料在航空航天领域的规模化应用,为飞机、卫星、火箭等航天器的性能升级、轻量化设计及安全可靠提升提供了关键支撑^[40]。PEEK可用于制造航空发动机的密封件、垫片和导管等部件,保证这些部件在高温和高压等极端环境下的性能稳定性,提高发动机安全可靠。PEEK具备高强度、轻量化的特点,还可以替代传统的铝和其他金属材料,用于制造航空器结构中的承力和连接部件,如梁、支架和连接件等,减轻航空器的质量,提高燃油效率和综合性能。例如,空客A350XWB的座椅框架、舱门导向机构以及部分排水管道等均采用PEEK复合材料制造,在实现减重40%的同时提升结构件的耐腐蚀性;美国NASA的火星探测器“毅力号”使用的轴承和连接器中使用了PEEK材料,上述结构件可在-130℃~125℃极端环境温度下长期稳定工作;中国商飞国产大飞机C919的发动机短舱部件已部分替换为国产PEEK材料,用于国产大飞机制造的PEEK用量逐年攀升。

2.2 汽车工业领域

汽车部件轻量化是未来的发展趋势,PEEK及其复合材

料可用于制造质量更轻、强度更高的汽车零部件,以提高汽车的燃油经济性和减少碳排放,同时还可以提高汽车的安全性和碰撞性能^[41~42]。Victrex公司通过与车企合作,使用PEEK制造了变速器阀门、油泵转子、叶轮等汽车零部件,实现了相关产品的非金属替代。例如,大众、日产等汽车公司大量使用PEEK材料制造垫片、密封件以及燃油管道等汽车零部件;比亚迪部分车型的电子膨胀阀阀针使用了PEEK材料,其耐高压可达5 MPa,使用寿命超过10万次。此外,经改性后的PEEK复合材料,还展现出优异的耐摩擦特性,被广泛应用于汽车齿轮、轴承、活塞环、离合器齿环等摩擦零部件。随着PEEK材料在汽车工业领域的应用普及,近年来全球新能源汽车PEEK市场规模空前增长。

2.3 电子信息领域

PEEK及其复合材料在电子信息领域有着广泛的应用,主要得益于其良好的介电性能、耐高温性、耐湿性、耐等离子体腐蚀特性和优异的电绝缘性。PEEK复合材料可用于制造高温电子元件、集成电路基板等,以推动电子信息技术的快速发展^[43]。PEEK材料可用于制造电容器、电阻器、电感器、连接等电子元器件,这些元器件对保障电子信息设备的安全可靠运行发挥着重要作用。在半导体封装材料领域,该材料也常用来制作晶圆承载器、电子绝缘膜片、线圈骨架、刻蚀设备部件等。例如,中微公司的5 nm刻蚀机腔体内衬中采用了PEEK绝缘部件,其介电常数稳定在3.2,有效保障了刻蚀均匀性误差<2%。PEEK还可用于制造手机、平板电脑电子设备的外壳和结构部件,以提供良好的电磁屏蔽效果,保护设备内部的电子元件免受外界电磁干扰的影响。

2.4 新能源领域

随着全球对可再生能源和环保技术的日趋重视,PEEK及其复合材料在电池、风电以及核能等新能源领域的应用也将得到拓展^[44~45]。PEEK及其复合材料具有出色的质子传导性能和化学稳定性,能够在恶劣环境下保持性能长期稳定,可用于制造燃料电池质子交换膜、锂电池隔膜以及太阳能电池的封装材料等,例如,特斯拉Model Y的电池包密封圈使用PEEK复合材料,其耐电解液腐蚀性能较常规材料提升5倍,有效降低电池热失控风险;宁德时代的储能电池热管理系统使用PEEK材质的三通阀,其耐电解液腐蚀性能可达到1 000 h,较尼龙部件寿命延长5倍。风力发电设备的叶片、轴承和齿轮箱等部件需承受高强度的机械负荷,使用PEEK改性材料进行加工制造可以提高设备的可靠性。此外,在核能领域,PEEK及其复合材料因具有优异的耐辐照性能,广泛应用于制造核反应堆组件(泵、阀门等)、辐射屏蔽材料以及绝缘密封材料,为核能设备的安全可靠运行提供了重要支撑。例如,华龙一号核电机组的电气贯穿件中大量使用了PEEK绝缘密封材料,有效地保障了电气贯穿件的耐温、耐辐照、电气绝缘以及密封性能满足设计要求。

2.5 生物医学领域

PEEK及其复合材料因其良好的生物相容性、潜在的抑

菌性、磁渗透性,在生物医疗领域也有着广泛的应用,该材料可用于制造新型医疗器械、手术缝合线、人工关节、心脏瓣膜、牙科植入物等,以改善医疗设备的性能和患者的生活质量^[46-47]。医疗器械通常需通过化学处理、高温处理或离子辐射等方式消毒,聚丙烯等常规塑料制成的部件经消毒后性能可能会出现衰减,而PEEK材质的医疗部件则具备优良的耐化学腐蚀与抗辐射性能。采用PEEK制造的膝关节、髋关节、脊柱等植入物,表现出与天然人类骨骼相似的特性,在医学上取得了较好的临床效果。例如,德国捷迈邦美推出的Mako机器人辅助关节置换系统,其仿生膝关节垫片材质为PEEK材料,垫片的磨损率低至每年0.01 mm,几乎接近人体软骨水平。此外,随着基于PEEK复合材料的3D打印技术的逐渐成熟,未来将会有更多精致而复杂的人体植入物在医学上得以应用,例如,西安铂力特通过3D打印技术制造PEEK脊柱侧弯支具,定制周期从14 d缩短至2 d,贴合度较常规技术提升90%。

3 结语与展望

本文总结了近年来通过化学改性、纤维增强、填充改性和有机共混等改性手段提升PEEK力学、热学和电学性能的研究进展,简述了各改性手段存在的主要问题以及未来的探索方向,介绍了PEEK及其改性材料在航空航天领域、汽车工业领域、电子信息领域、新能源领域以及生物医学领域中的应用现状。本文对PEEK改性研究的展望如下。

(1)化学改性需重点关注改性环境条件的温和性和高效性,改性工艺实现工业放大应用的可行性以及改性产品的经济性,纤维增强改性需重点考虑优化纤维与PEEK基体的界面结合力,填料增强改性需重点提升填料在PEEK基体中的分散均匀性,有机共混改性需重点解决PEEK基体与无定型聚合物之间的共混相容性问题。

(2)大量研究结果表明,通过单一手段对PEEK材料进行改性,得到的复合材料的某些性能可以大幅提升,但往往又会造成其他性能的明显下降。复合材料的性能优化机理需进一步深入探究,如何通过改性手段协同提升复合材料的综合性能,是未来PEEK材料改性研究的重点方向。

(3)随着数学建模和模拟方法的发展,未来的改性研究可以借助计算模拟手段进行优化设计。通过建立PEEK复合材料的理论计算模型,预测材料的微观结构特性和宏观性能指标,用于指导合理设计实验和优化改性方案,从而提高新型复合材料的研究效率。

参考文献

- [1] 刘俊聪,等.工程塑料应用,2022,50(2):169-174.
LIU Juncong, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2): 169-174.
- [2] 任天翔,等.塑料科技,2022,50(9):123-128.
REN Tianxiang, et al. Plastics Science and Technology, 2022, 50(9):123-128.
- [3] DALLAL S, et al. Polymers, 2025, 17. DOI: 10.3390/polym 17141968.
- [4] ZOL S M, et al. Polymers, 2023, 15. DOI: 10.3390/polym 15092170.
- [5] MENG L, et al. Macromolecular Materials and Engineering, 2023, 308(5). DOI:10.1002/mame.202200559.
- [6] 方良超,等.合成材料老化与应用,2019,48(2):115-118.
FANG Liangchao, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(2):115-118.
- [7] CHOUDHURY S S, et al. Reviews of Adhesion and Adhesives, 2021, 9(3):401-433.
- [8] ZHAO S, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(8):6 607-6 624.
- [9] 王永鹏.含硼PAEK的制备、性能及其在PEEK复合材料改性中的应用研究[D].长春:吉林大学,2015.
WANG Yongpeng. Preparation and properties of boron-containing poly(aryl ether ketone) and application in PEEK composite modification[D]. Changchun:Jilin University, 2015.
- [10] 王辉,等.高等学校化学学报,2013,34(5):1 033-1 035.
WANG Hui, et al. Chemical Journal of Chinese Universities, 2013, 34(5):1 033-1 035.
- [11] 王汉夫,等.高等学校化学学报,2004,25(6):1 156-1 159.
WANG Hanfu, et al. Chemical Journal of Chinese Universities, 2004, 25(6):1 156-1 159.
- [12] 陈俊俊.共聚改性制备羧基化PEEK[D].杭州:浙江大学,2023.
CHEN Junjun. Preparation of carboxylated polyetheretherketone via copolymerization[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2023.
- [13] 马春成,等.化工新型材料,2013,41(5):55-57.
MA Chun Cheng, et al. New Chemical Materials, 2013, 41(5): 55-57.
- [14] XIE J, et al. Polymer bulletin, 2011, 67:45-56.
- [15] 徐姗姗,等.材料开发与应用,2021,36(5):83-88.
XU Shanshan, et al. Development and Application of Materials, 2021, 36(5):83-88.
- [16] LI N, et al. Reviews on Advanced Materials Science, 2020, 59(1): 399-405.
- [17] LI E Z, et al. Physics Procedia, 2013, 50:453-460.
- [18] 贺捷,等.工程塑料应用,2009,37(7):50-52.
HE Jie, et al. Engineering Plastics Application, 2009, 37(7):50-52.
- [19] 张照,等.高分子材料科学与工程,2017,33(10):141-148.
ZHANG Zhao, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2017, 33(10):141-148.
- [20] 刘磊,等.高分子材料科学与工程,2023,39(11):75-81.
LIU Lei, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2023, 39(11):75-81.
- [21] HASSAN E A M, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 112:155-160.
- [22] LI J, et al. Composites Part B: Engineering, 2023, 267. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.111067.
- [23] 黄素玲,等.化工新型材料,2022,50(4):1-5.

- HUANG Suling, et al. *New Chemical Materials*, 2022, 50(4):1–5.
- [24] ÖZ Y, et al. *Polymer Science, Series A*, 2022, 64(3):145–160.
- [25] GOYAL R K, et al. *European Polymer Journal*, 2005, 41(9):2 034–2 044.
- [26] 张振清, 等. *塑料科技*, 2020, 48(8):44–47.
- ZHANG Zhenqing, et al. *Plastics Science and Technology*, 2020, 48(8):44–47.
- [27] LIU H, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(22). DOI: 10.1002/app.48749.
- [28] CHEN C, et al. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2021, 124. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104811.
- [29] ATA S, et al. *Polymer*, 2019, 176:60–65.
- [30] JIANG Z, et al. *Polymer Composites*. 2023, 44(7):4 279–4 288.
- [31] LIU L, et al. *Applied Sciences*. 2024, 14(5). DOI: 10.3390/app14051723.
- [32] LAI W W, et al. *e-Polymers*, 2020, 20(1):542–549.
- [33] 李思远, 等. *中国塑料*, 2014, 28(5):1–10.
- LI Siyuan, et al. *China Plastics*, 2014, 28(5):1–10.
- [34] 申维新, 等. *复合材料学报*, 2021, 38(6):1 809–1 816.
- SHEN Weixin, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(6):1 809–1 816.
- [35] 王运良, 等. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(3):402–405.
- WANG Yunliang, et al. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2013, 31(3):402–405.
- [36] 王丽娜. 一种热塑性聚酰亚胺改性 PEEK 树脂耐热性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- WANG Lina. Research on heat-resistant property of PEEK resin modified by a thermoplastic polyimide[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [37] BAI X, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(20). DOI: 10.1002/app.53851.
- [38] NIU S, et al. *Polymer Testing*, 2023, 117. DOI: 10.1016/j.polymer-testing.2022.107858.
- [39] WANG T, et al. *Chemistry Select*, 2020, 5(19), 5507–5514.
- [40] 张辉, 等. *新技术新工艺*, 2018, (10):5–8.
- ZHANG Hui, et al. *New Technology & New Process*, 2018, (10): 5–8.
- [41] 王立颖, 等. *科技视界*, 2013(33):306.
- WANG Liying, et al. *Science & Technology Vision*, 2013(33):306.
- [42] ZHANG Y, et al. *Composites Science and Technology*, 2018, 165: 148–153.
- [43] 张丽. *化工新型材料*, 2020, 48(5):1–6.
- ZHANG Li. *New Chemical Materials*, 2020, 48(5):1–6.
- [44] HARUN N A M, et al. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(14):19 671–19 708.
- [45] 王锦艳, 等. *大电机技术*, 2017(2):1–6.
- WANG Jinyan, et al. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2017(2):1–6.
- [46] VERMA S, et al. *European polymer journal*, 2021, 147. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110295.
- [47] PANAYOTOV I V, et al. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2016, 27:1–11.