

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.027

聚苯硫醚改性及应用研究进展

丁言祯

(济南市企业技术进步促进中心, 济南 250031)

摘要: 聚苯硫醚(PPS)综合性能优异,被广泛应用于 5G 和新能源汽车等新兴工业领域。综述了近年来 PPS 的热门改性方向,在增强改性方面,采用纤维增强、合金化、纳米材料增强等方法提升 PPS 的力学性能;在增韧改性方面,采用弹性体增韧等共混手段提升 PPS 的冲击强度;在导热改性方面,通过填充高导热系数的填料改善 PPS 的导热性能;在低介电改性方面,使用聚合物共混、低介电填料、微发泡工艺等方式降低 PPS 的介电常数和介电损耗。介绍了 PPS 在不同应用领域研究进展,包括水处理用复合膜、电池隔膜、PPS 纤维滤料以及 PPS-金属复合构件。最后对 PPS 未来的发展方向进行了展望,聚焦于提高 PPS 的综合性能、拓宽应用领域并降低成本。

关键词: 聚苯硫醚;改性;应用;增强;增韧;导热性能;低介电;膜

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0188-10

Research progress in modification and application of polyphenylene sulfide

DING Yanzhen

(Jinan Enterprise Technology Progress Promotion Center, Jinan 250031, China)

Abstract : Poly (phenylene sulfide)(PPS) exhibits outstanding comprehensive properties and has been widely applied in emerging industrial fields such as 5G communications and new energy vehicles. This review summarizes recent research hotspots in PPS modification. In terms of reinforcement modification, methods including fiber reinforcement, alloying, and nanomaterial enhancement have been employed to improve the mechanical properties of PPS. For toughening modification, elastomer toughening and other blending techniques have been adopted to enhance the impact strength of PPS. Regarding thermal conductivity modification, the incorporation of high-thermal-conductivity fillers has been utilized to optimize the thermal performance of PPS; Concerning low-dielectric modification, approaches such as polymer blending, low-dielectric filler addition, and micro-foaming processes have been applied to reduce the dielectric constant and dielectric loss of PPS. Review also presents research progress on PPS applications in various fields, including composite membranes for water treatment and battery separators, PPS fiber filter materials, and PPS-metal composite components. Finally, future development directions for PPS are proposed, focusing on enhancing its comprehensive performance, expanding application fields, and reducing production costs.

Keywords : polyphenylene sulfide ; modification ; application ; reinforcement ; toughening ; thermal conductivity ; low dielectric ; membrane

聚苯硫醚(PPS)具有优异的机械强度、热稳定性、加工性能,但其属于脆性材料,抗冲击性较差,且具有在高温下容易被氧化、导热性能低等缺点。为了进一步提升 PPS 的性能,扩大应用范围,需要对其进行不同方向的改性。通过填料、纤维及其他聚合物改性和增强的 PPS 复合材料,其机械性能、导热性能及介电性能等有着显著提升,这使其成为极具

吸引力的工程材料^[1-2]。近年来随着 5G 和新能源汽车等新兴行业的发展,改性 PPS 的应用领域正在不断拓展,比如锂电池支架、隔膜、电容外壳、航空航天电子设备、智能终端等等。笔者系统综述了 PPS 在增强改性、增韧改性、导热改性和低介电改性方向的最新成果,以及在复合膜、纤维、工程塑料等应用领域研究进展。

通信作者: 丁言祯,高级工程师,从事化工新材料的研发及分析测试

收稿日期: 2025-04-20

引用格式: 丁言祯. 聚苯硫醚改性及应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 188-197.

DING Yanzhen. Research progress in modification and application of polyphenylene sulfide[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 188-197.

1 PPS的改性研究

1.1 增强改性

纯PPS的拉伸强度约为60 MPa,弯曲强度约为120 MPa,弯曲模量约3.8 GPa,弹性模量约3.7 GPa,相对成本而言性价比比较低,可应用场景较少。目前,通常采用纤维增强、合金化、纳米材料增强等方法对PPS进行增强改性,在提升力学性能的同时降低成本。

1.1.1 纤维增强

碳纤维(CF)和玻璃纤维(GF)等都是具有高强度、高模量的纤维材料,纤维的添加可以很好地增强PPS的机械强度和化学稳定性,同时降低PPS用量,降低成本。

张佳新等^[3]使用混编法制备了长玻璃纤维(LCF)/PPS混编织物,再通过模压成型制备出LCF增强的PPS复合板材。使用不同种类的硅烷偶联剂(SCA)对复合板材进行处理,结果发现: γ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH560)、 γ -(甲基丙烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷(KH570)处理的层压板拉伸强度和弯曲强度都有不同程度的提高,其中KH560处理后的层压板拉伸强度达到920.1 MPa,弯曲强度达到890.6 MPa。丁大有等^[4]利用双转子连续混炼挤出机,通过熔融共混法制备了CF/PPS复合材料。研究发现,挤出机转子转速和CF含量对复合材料的机械性能有显著影响。当转子转速为200 r/min、CF质量分数为20%时,制得的PPS/CF复合材料的弯曲强度为95.14 MPa、弯曲模量为10.99 GPa,均优于纯PPS。

Hu等^[5]开发了一种新型的两步协同改性策略,通过液相氧化结合SCA接枝的工艺来改善CF/PPS复合材料的纤维-基体界面强度。液相氧化处理显著提高了CF表面的粗糙度及含氧活性基团含量,而在CF表面接枝SCA则是通过化学改性的方式,在CF与PPS基体之间形成了良好的润湿性和强结合力。改性后CF/PPS复合材料的拉伸强度、弯曲强度和界面剪切强度分别达到677.86, 987.74, 82.39 MPa,较原CF/PPS复合材料分别提高了5.96%, 36.18%, 21.73%,有效增强了力学性能,具备工业化的潜力。

赵乐等^[6]采用薄膜叠层模压成型的方法制备了CF/PPS复合材料,通过改变等温结晶温度,探究了PPS结晶度对CF/PPS复合材料力学性能的影响。结果表明,CF/PPS复合材料中PPS的结晶度随等温结晶温度的升高呈现先增后减的趋势,当等温结晶温度为230 °C时结晶度最高,具有优秀的机械性能,弯曲强度为709 MPa,弯曲弹性模量为81.9 GPa,界面剪切强度为23.8 MPa。

Sidim等^[7]采用熔融浸渍法制备LCF增强的PPS丝材,用于熔融沉积成型(FDM)技术,并探究了不同销钉角度对PPS复合材料力学性能的影响。实验结果表明,采用82°销钉制备的复合材料拉伸强度达612.95 MPa,弹性模量达34.56 GPa。Li等^[8]以LGF作为增强材料,使用熔融共混工艺得到PPS/GF复合材料。实验结果表明,在纤维长度增加5.45%的情况下,LGF/PPS复合材料的拉伸强度相比短切玻

璃纤维(SGF,长度为3 mm)/PPS复合材料提高了11.25%~13.6%。值得注意的是,LGF的原料成本不足CF的10%。由此可见,LGF的使用能够促进造价低廉且坚固耐用的PPS复合材料的开发,满足工程应用中高强度和耐高温的要求。

1.1.2 合金化

塑料合金是指通过物理共混和化学接枝的方法得到的一种高性能、功能化、专用化的新材料。合金共混改性可以克服纯PPS性能上的局限性,降低生产成本,扩大材料的应用领域。此外,研究者们还采用合金化与纤维增强复合的协同体系来提升PPS的力学性能。

Yuan等^[9]通过固相拉伸/超临界二氧化碳间歇发泡的协同方法构建取向结晶结构,制备了超强聚苯醚(PPO)/PPS共混泡沫。之后,引入聚苯乙烯-缩水甘油基甲基丙烯酸酯共聚物(SG)制备得到PPO/SG/PPS泡沫,成功改善了PPO/PPS两相之间的界面相容性,提高了共混物的拉伸性能。提高拉伸比和形成更多PPS晶体有助于保持定向结构,对于拉伸比为200%的取向泡沫,其强度和模量分别较各向同性泡沫提高了86%和140%。致密的泡孔结构和取向纤维结构显著提升了PPO/SG/PPS泡沫的力学强度。这种高性能聚合物泡沫在恶劣环境下的航空航天领域具有重要应用价值。

Kim等^[10]探究了超声波对PPS与聚砜(PSU)共混物的影响。使用配备超声波装置的熔融混合机制备了PPS-PSU共混物,通过各项研究和表征可知,超声处理后共混物的性能会随着超声时间的变化而改变。超声波照射仅60 s,其热性能和力学性能均有显著提高,其中拉伸强度和弯曲强度均提高约30%。这种增强效应被认为是由PPS和PSU在超声过程中原位生成的共聚物改善了其两相之间的界面结合强度所致。

Tiwari等^[11]制备了高性能的聚醚醚酮(PEEK)/PPS共混物复合材料。所制备的共混样品均呈现单一玻璃化转变温度(T_g),表明PPS与PEEK具有良好相容性。PEEK的加入显著提高了PPS基体的冲击强度和拉伸强度,其中PPS与PEEK质量比为1:4时的共混物的拉伸强度达到160.64 MPa,较纯PPS有明显提升。

尹立等^[12]采用双螺杆挤出机挤出工艺,制备了硅微粉改性的聚酰亚胺(PI)/PPS/GF复合材料,研究发现,随着硅微粉用量增大,复合材料的弯曲强度和拉伸强度呈现先上升后下降的趋势。当添加质量分数为20%的硅微粉时,材料的拉伸强度达到153 MPa,弯曲强度达到195 MPa,具备良好的综合性能。

1.1.3 纳米材料增强

纳米材料改性是提升PPS综合性能的重要手段。使用碳纳米管(CNT)、石墨烯、纳米二氧化硅等对PPS进行表面处理或直接作为填料,可以显著提升PPS的力学性能。

Jung等^[13]使用微共混技术制备了PPS/NGO纳米复合材料,其中NGO是以氧化石墨烯(GO)表面的羧基团作为引发剂接枝尼龙6 (PA6)得到的。PA6与PPS具有良好的相容

性,能够显著提升PPS的力学性能。此外,石墨烯纳米片凭借其独特的机械增强效应和热阻隔作用,进一步提升了复合材料的各项性能。实验表明,当添加质量分数为0.03%的NGO时,复合材料的拉伸强度和断裂伸长率分别比纯PPS提高了32%和30%。

Pan等^[14]通过马来酰亚胺聚合物(MIPs)包覆处理制备了CNT分散均匀的3D打印PPS材料,并系统分析了CNT质量分数(0%~0.9%)对复合材料摩擦学性能、力学性能和热性能的影响。实验结果表明,与纯PPS相比,CNT增强后的PPS材料拉伸强度和弯曲强度分别提升26%和29%。这项研究有望提升3D打印PPS材料的工程应用价值。

Kim等^[15]介绍了一种高性能CNT/PPS复合纤维的制备与表征方法。通过将PPS溶解于氯磺酸(CSA)中作为湿法纺丝原液,制得CNT/PPS复合纤维。研究发现,当PPS质量分数为30%,经1400℃热处理后可得到最高抗拉强度 $[(6.04 \pm 0.50) \text{ GPa}]$;当PPS质量分数为10%,经2500℃热处理后可获得最佳弹性模量 $[(619 \pm 44) \text{ GPa}]$ 。整体而言,这项研究对于实现PPS纳米材料的低成本、高性能化是一个行之有效的办法,在航空航天、新能源等领域具有重要应用价值。

Wang等^[16]将CF/PPS塑料颗粒与石墨烯微片(GNP)颗粒进行机械共混,制备了GNP/CF/PPS复合材料,并测试了其在材料挤出(MEX)增材制造过程中的机械性能。实验结果表明,GNP/CF/PPS复合材料中GNP质量分数为0.03%时力学性能显著提高,其弯曲强度(520 MPa)比纯CF/PPS提高了30%。这项成果为提升MEX成型大型复合材料的力学性能与稳定性提供了重要的理论支持。

Aslan等^[17]探究了在不同质量比下,单独或混合添加六方氮化硼(hBN)和GNP对PPS复合材料性能的影响。70℃拉伸试验结果表明,在BF增强的复合材料中添加质量分数为0.3%的GNP和质量分数为1%的hBN可使拉伸强度提高40%。GNP与hBN的协同作用显著改善了PPS复合材料的高温拉伸强度、黏着耐磨性能及耐热性能,适用于高端复合材料应用领域。

1.2 增韧改性

PPS具有较高的分子链刚性,结晶度可达75%,因此其延伸率较低且熔接强度也一般,导致未改性PPS的抗冲击性较差,限制了应用范围。PPS的增韧改性主要分为共混和共聚两个方向,而共聚增韧受成本和性能约束,工艺尚不成熟,这里主要介绍共混增韧的相关进展。

1.2.1 弹性体增韧

弹性体增韧是提升PPS抗冲击性能的有效途径,通过选择合适的弹性体并优化共混工艺,可显著改善PPS的韧性。

沈澄英等^[18]采用增容剂氢化丁苯胶接枝马来酸酐(SEBS-g-MAH)制备了聚苯醚(PPO)/聚苯硫醚/玻璃纤维复合材料。实验表明,SEBS-g-MAH质量分数为3%、GF质量分数为30%时,复合材料具备最优机械性能,此时冲击强度为 9.2 J/m^2 ,较未加增容剂的复合材料增大了50%。

Nara等^[19]将PPS与乙烯-甲基丙烯酸酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯三元共聚物(EGMA)及聚苯砜(PPSU)按56:14:30的质量比进行熔融共混,成功制备出超韧性PPS复合材料,实现了 800 kJ/m^2 的优异冲击强度,并详细探究了其增韧机制。研究表明,PPS与EGMA的界面化学反应以及PPS与PPSU的部分相容性对复合材料起到了协同增韧的作用。

Kim等^[20]采用熔融共混的方法,制备了苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)弹性体增强的PPE/PPS多元共混物。在含恶唑啉官能团的反应型聚苯乙烯(RPS)增容剂的作用下,增韧剂SEBS在PPS中实现了相容,从而获得优秀的冲击强度,在20℃时,冲击强度达 65 kJ/m^2 (与耐冲击代表材料聚碳酸酯相当),而在-40℃极端环境下仍能保持 10 kJ/m^2 的冲击强度。这种能够在宽温域保持良好热学与机械性能的共混物,有望作为新型工程塑料开发和使用。

易成鸿等^[21]基于高拉伸混沌流的混炼转子,通过熔融共混法制备了SEBS/PPS复合材料。实验结果表明,随着SEBS含量的增加,PPS复合材料的冲击强度和断裂伸长率呈现先增加后下降的趋势,当SEBS质量分数达到6%时,复合材料的冲击强度和断裂伸长率达到最高,分别为 57.8 J/m 和6.1%。

Rangarajan等^[22]开发了一种新型共混体系,该体系包含PPS与钠离子部分中和的乙烯-甲基丙烯酸离聚物,这是一种特殊的热塑性弹性体。共混体系呈现两种相形态:当钠离子离聚物质量分数 $\leq 20\%$ 时表现为海岛结构,而离聚物质量分数 $\geq 30\%$ 时则形成纤维状结构。动态机械分析(DMA)中 $\tan\delta$ 值的升高表明共混物的阻尼能力(柔韧性)显著提升。钠离聚物的加入使共混物断裂伸长率和冲击强度显著提高,当质量分数为50%时,断裂伸长率提升约180%,冲击强度提高162%。

1.2.2 其他增韧方法

除弹性体增韧外,其他种类的PPS合金,以及纳米填料、纤维增韧等改性方式同样可以实现韧性的提升。

刘晨珺等^[23]基于GF增强、PA66增韧、空心玻璃微珠(HGM)减重的研究思路,采用熔融共混法制备了一系列HGM/GF/PA66/PPS四元复合材料。结果表明,加入少量PA66可显著提升PPS复合材料的韧性和水润滑性能,且不会影响其力学强度。当GF质量分数为30%、PA66质量分数由0%增加至25%时,PPS复合材料的冲击强度提高67%,并具备优异的综合性能。

Bhalwankar等^[24]使用熔融共混法,通过添加纳米填料二硫化钨(WS_2)、二硫化钼(MoS_2)以及增韧剂聚甲基丙烯酸缩水甘油酯(PEGM)来提高PPS聚合物的冲击强度。实验结果表明,添加质量分数20%的PEGM和0.5%的 WS_2 后PPS复合材料冲击强度达 134.82 J/m ,显著高于纯PPS的 50.98 J/m 。实验对比发现,添加较低质量分数的 WS_2 和 MoS_2 (质量分数0.5%~1%),即可实现PPS复合材料冲击强度的显著提升。

Wang等^[25]通过熔融共混的方法制备了PPS/石墨烯量子

点纳米复合材料。通过差示扫描量热法研究了复合材料的非等温结晶情况,结果表明石墨烯量子点有效地提高了PPS的结晶速率。力学测试表明,当石墨烯量子点的质量分数为0.5%时,PPS的拉伸强度和冲击强度得到显著提高,其中冲击强度提高了375%。

Xu等^[26]在液晶聚合物/聚苯硫醚(LCP/PPS)复合材料中引入接枝有GO的GF,以提高其力学性能。采用硅烷偶联剂 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)对GF进行表面改性,实现了GO的接枝。随后,经挤出注射成型制备得到GO-GF/LCP/PPS复合材料。结果表明,当GO质量分数为0.5%时,复合材料的机械性能得到明显改善,其冲击强度相比于不含氧化石墨烯的复合材料提高了50%,摩擦系数从0.28降低至0.22。

Garmabi等^[27]利用材料挤出增材制造技术制造了回收碳纤维(rCF)增强的PPS复合材料。结果表明,相比于纯PPS,添加质量分数10%的rCF可使材料的抗冲击性能提升60%以上。这项研究显示,该复合材料有可能成为汽车应用领域的重要候选材料。

Yao等^[28]受珍珠层的“砖-泥”结构启发,研究开发出一种高刚度、高强度和高韧性的PPS复合材料。这种材料是以LCF层(“砖”)与芳纶短切纤维(ACFs)/PPS组成的3D有机纤维网络(“泥”)叠加形成的。在保持刚度的同时,其能量吸收率和断裂韧性可分别提高190.60%和165.78%,兼顾刚度、强度与韧性,并具备优异的抗冲击性能。这种3D有机硅泥网络的设计开辟了国防军工、航空航天和交通运输领域的强韧安全复合材料制备的新路径。

1.3 导热改性

PPS具有良好的耐热性能,但导热系数较低,普遍低于0.5 W/(m·K),这严重限制了其在新能源汽车动力电池或5G高频等场景的应用。目前主要通过填充高导热系数的填料来改善PPS的导热性能。

为了提高PPS的热导率,Gozde等^[29]采用双螺杆挤出法制备了合成石墨(SG)/PPS复合材料。将不同质量分数(10%,30%,50%)的SG添加到PPS中,测量复合材料的面内和面外导热系数。当PPS中添加50%的SG时,其面内和面外导热系数分别达到6.54 W/(m·K)和1.5 W/(m·K),较纯PPS有着显著提升。后续的试验结果表明,尽管添加了SG,PPS的力学性能未受到显著影响。在此基础上,Altay等^[30]采用双螺杆挤出机和注塑成型工艺制备了添加石墨烯和SG的PPS复合材料。实验结果表明,添加质量分数5%的石墨烯和40%的SG后PPS复合材料面内和面外热导率分别达到26.45 W/(m·K)和5.02 W/(m·K)。这种卓越的面内导热性能源于复合材料在熔体流动过程中,石墨烯和石墨填料层状结构沿流动方向定向排列,从而形成了高效导热通路。

Zhang等^[31]通过高压成型技术,设计并制备了一种具有双分离结构的氮化硼纳米片(BN)/石墨烯微片(GNP)/PPS复合材料。该材料内部形成双分离结构,其中GNP与BN在

PPS基体的界面处明显分离并定向排列。这种结构一方面赋予材料高导热性,另一方面聚集的BN层可作为“隔离带”有效抑制电子传输。实验发现,以质量分数30%GNP和10%BN为填料、经600 MPa高压热压制备的PPS复合材料展现出最优综合性能:热导率达6.4 W/m·K,电磁干扰(EMI)屏蔽效能高达70 dB,由此可见,这种复合材料可以应用于复杂环境下微型电子器件的制备。

Shi等^[32]利用聚多巴胺(PDA)自聚合及PDA与聚乙烯亚胺(PEI)共聚合作用,在PPS粉末表面包覆了羧基功能化多壁碳纳米管(CNTs)和碳化硅(SiC),制得一种PDA/CNTs/SiC/PPS杂化材料。结果表明,PDA/CNTs/SiC/PPS的热导率相比CNTs/SiC/PPS提高约120%,达到0.97 W/(m·K)。这种自润滑聚合物复合材料在具有高效散热需求的领域具有广阔应用前景。

Kim等^[33]通过CF和GO填料来提升PPS的热导率和摩擦学性能。经过3-巯丙基三甲氧基硅烷(MPTMS)改性后的CF/GO/PPS复合材料热导率达0.323 W/(m·K),较纯PPS复合材料提高了175%。次年,Kim等^[34]选择了三聚氰胺包覆的氢氧化钙铝层状双氢氧化物(CaAl-LDH)作为阻燃填料,制备了另一种PPS复合材料。测试显示,含有质量分数40%CaAl-LDH的PPS复合材料导热性能提升至0.37 W/(m·K)(约为PPS/GF复合材料的两倍),同时机械性能大幅增强,并具备良好的阻燃特性。随后,Kim等^[35]将二维二硫化钼(MoS₂)纳米片与CNTs用热压法结合到一起,并整合PPS层以保证结构完整。实验研究表明,这种复合材料在导热性方面实现了显著提升,达到5.77 W/(m·K)。此外,Kim等^[36]还合成了核壳结构氧化镁包覆MoS₂(MgO@MoS₂)/PA/PPS复合材料,其MgO@MoS₂的横向热导率达到4.07 W/(m·K),是纯PPS的22倍。这些工作为开发高性能PPS材料提供了新的思路,在汽车行业等多个领域具有较大的市场应用潜力。

Kiepf等^[37]展示了采用复合材料制造人字形板式换热器垫片的过程。所制备的PPS-石墨板材实现了高达2.4 W/(m·K)的导热系数。实验结果表明,在壁厚0.85 mm时,水-水换热工况下可实现高达1850 W/(m²·K)的总传热系数。

Cho等^[38]使用PPS作为基体,通过同步接枝工艺引入由研磨玻璃纤维(mGF)、BN和GO组成的混合填料,并结合聚儿茶酚/聚胺(PCPA)与硅烷添加剂进行表面改性,有效解决了填料在树脂基体中的团聚问题。PCPA在填料表面的聚合反应实现了与硅烷分子间的桥接作用。实验结果表明,经表面处理的混合复合材料导热系数较基体提升了637%,拉伸强度提高了63.94%,分别达到2.102 W/(m·K)和65.87 MPa。该混合填料复合材料显著提升了导热与力学性能,为电动汽车及电子设备在结构强度与散热方面提供了一种高效便捷的解决方案。

王晓芳等^[39]采用低温高压的模压工艺制备了Al₂O₃/PPS/BN高导热复合材料。实验结果表明,Al₂O₃质量分数为89%,BN质量分数为3%,PPS质量分数为8%时,复合材料

的导热率达 $5.44\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,最高导热率是环氧树脂的21.76倍,且兼具优秀的机械性能。

1.4 低介电改性

目前5G、物联网等电子领域对高频化、小型化的产品需求不断增大。为了实现更快的数据传输速度,需要降低介电损耗和优化介电常数。PPS稳定的介电性能和其他特性使其在5G行业有着巨大发展潜力。目前通常使用聚合物共混、低介电填料、微发泡工艺等方式对PPS进行改性,使其在保持优良综合性能的同时降低介电常数和介电损耗。

Yang等^[40]采用KH-560/氨基丙基异丁基多面体低聚倍半硅氧烷($\text{NH}_2\text{-POSS}$)协同改性六方纳米氮化硼填料(f-nBN)的表面,制备了f-nBN/PPS纳米复合材料。实验表明,当f-nBN填料质量分数为60%时,复合材料表现出卓越的介电特性,介电常数为3.99,同时兼具高导热系数和优异的热稳定性。该材料可广泛用于电子封装、超高压电气设备等领域。

Huang等^[41]通过造纸和热压层压相结合的方法来组合芳纶纤维(AF)和PPS,从而制造高频印刷电路板。先将PPS非织造布与AF浸泡在去离子水中,进行高强度剪切形成混合纸;再通过热压工艺得到AF/PPS复合层压板。结果显示,该复合材料在 $15\text{ kHz}\sim 2\text{ MHz}$ 范围内达到了3.3的低介电常数,展现出优秀的高频介电性能和频率稳定性。之后,Huang等^[42]制备了ACFs/PPS复合纸,其介电常数即使在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 高温下仍保持稳定。这些研究为制备兼具优异力学性能和低介电常数的先进复合材料提供了有效方法。

Cao等^[43]首先制备了一种低表面能的含氟流动改性剂(Si-DF),再通过熔融共混法将其应用于BN/PPS复合材料。该材料具有高导热系数、优异介电性能和机械性能,且易于机械加工。当BN填料质量分数为70%时,在质量分数5%Si-DF的改性作用下,BN/PPS/Si-DF复合材料仍表现出3.76的低介电常数。BN/PPS/Si-DF复合材料的研究为开发同时具有高导热系数和低介电常数的电子封装用高性能聚合物基复合材料提供了一条可行的途径。

Zhao等^[44]合成了一种含羧基的PPS(PPS-2COOH),并采用该材料与BN,LGF复合制备了 PPS-2COOH/LGF/BN 复合材料。结果表明,羧基的引入未影响PPS的分子结构与热性能。所制备的复合材料表现出优异力学性能和卓越耐化学腐蚀性能。介电性能测试表明,随着频率升高,介电常数与介电损耗呈递减趋势—— PPS-2COOH/LGF/BN 的介电常数为3.9,介电损耗低至0.01。由此可见, PPS-2COOH/LGF/BN 复合材料在5G高频高导热材料领域具有重要应用价值。

Yao等^[45]报道了一种具有三明治结构的ACFs/PPS复合纸。PPS膜与ACFs/PPS复合纸之间形成的强界面阻隔效应能有效延缓电压向纸基内部传输。同时,致密的PPS微纤膜填充并修复了ACFs/PPS复合纸的孔隙与缺陷。由此获得的夹层结构ACFs/PPS复合纸展现出卓越的介电性能,其介电损耗角正切小于0.003 5,同时兼具优秀的力学强度和击穿强度,其综合性能远超现有报道的芳纶纸基材料。这项工作

为构建具有多属性协同效应的芳纶纸基材料提供了新思路,相关设计策略也可拓展至其他高性能复合材料体系。

Zhang等^[46]利用超临界二氧化碳(scCO_2)发泡工艺的低介电特性,制备出发泡倍率高且泡孔均匀的PPS微孔发泡材料,在 3 GHz 时具有超低介电常数(1.14)和介电损耗(0.000 5)。在 $26\sim 40\text{ GHz}$ 的Ka波段,宽带信号传输几乎无衰减(传输效率可达99%)。此外,该材料具备低密度和疏水特性,且阻燃等级达到了V-0级,综合性能优异。这种超高毫米波透射材料为解决现有介电材料中毫米波传播的问题提供了一种可靠的替代方案。

第六代(6G)通信对超高太赫兹透射率有着较高需求,因此需要开发具有低太赫兹信号损耗的专用低介电材料,而最高效的方法是利用超低介电常数的空气来降低介质材料的太赫兹损耗。Chen等^[47]选择介电常数极低的PTFE形成原位纳米纤维,并通过无残留超临界 CO_2 发泡法将大量超低介电常数的空气引入PTFE/PPS纳米复合材料。所得PTFE/PPS纳米复合微孔泡沫在太赫兹频段表现出优异的低介电性能(介电常数为1.19,介电损耗为0.000 255),并实现了超高太赫兹透射率($>90\%$)。这项工作提出的策略为6G通信用低太赫兹信号损耗材料的制备提供了参考。

2 PPS的应用

2.1 复合膜领域

随着电池和电解槽行业的高速发展,对高性能分离膜的需求也在不断提升。电解液包含复杂的化学成分,如强极性有机溶剂、酸性及碱性溶液^[48];为保证电池稳定运行,还需要保证分离膜的热稳定性。除了电池与电解槽行业,工业水处理领域分离膜同样面临着极端化学环境的挑战。因此,具有耐高温、耐有机溶剂、耐酸碱和抗氧化性能的复合膜的研发已成为膜科学与技术的研究重点,而这也是聚合物材料在科学与工程领域的研究热点之一。

PPS是所有热塑性树脂中热稳定性最佳的一种,它在空气中的分解温度超过 $450\text{ }^\circ\text{C}$,长期使用温度约为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。此外,PPS还具有出色的化学耐腐蚀性,在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以下几乎无法被任何溶剂溶解^[49]。PPS还能抵抗几乎所有强酸、强碱和高浓度盐溶液的腐蚀^[50-52]。得益于这些独特的性能,PPS可用于制备水处理用复合膜和电池隔膜,改性方法主要包括磺化处理、表面涂覆法以及原位复合技术。

2.1.1 水处理膜

贾康等^[53]通过热致相分离(TIPS)法,以氧化多壁碳纳米管和GO亲水性纳米粒子的化学交联物(MWCNT@GO)为填料,通过物理共混制备了 MWCNT@GO/PPS 杂化膜。这种杂化膜显示出了良好的水通量,可达 $130\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,同时还具有优秀的拦截性能,对牛血清蛋白大分子的截留率接近100%,对甲基蓝(MB)染料的截留率也达到了92%左右。这种PPS杂化膜在强酸性、强碱性及腐蚀性环境中展现出优异的性能,并具备良好的热稳定性,可应用于含有机溶剂、高温液体、强酸碱废水的水处理领域。

Kou 等^[54]提出了一种在恶劣环境下制备 PPS 油水乳液分离膜的新策略:通过静电纺丝结合烧结技术,以聚乙烯醇(PVA)为模板、聚丙烯腈为支撑基底制备 PPS 复合纳米纤维膜。系统研究了 PPS/PVA 质量比和烧结温度对膜结构与性能的影响,筛选出最优膜材料并进行油水乳液分离实验。结果表明,所制备 PPS 膜的水接触角大于 150° ;在重力作用下对表面活性剂稳定的油水乳液分离时,最大纯油通量达 $1\ 707\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,分离效率约 99%;该膜在有机混合溶液或酸碱溶液中浸泡 5 天后仍保持良好的耐化学性。

Zhang 等^[55]使用含有 H_2O_2 、 CH_3COOH 和 Amberlyst15 的氧化溶液,通过热诱导相分离制备合成了 PPS 膜,并对其进行修饰改性,同时在膜表面引入 SO_2 基团,得到了 PPS/氧化聚苯硫醚(OPPS)复合膜。相较于纯 PPS 膜,这种复合膜的亲水性、耐化学性、溶剂性以及水通量都得到明显提升,同时具有优异的染料截留性能,对 MLB 和刚果红(CR)的分离效率均超过 94%。同年,该课题组^[56]利用多步界面聚合方法合成了聚酰胺(PA)/氧化物-纳米氧化石墨烯(O-NGO)/PPS 复合膜。在金属盐溶液截留实验中发现,相较于粗糙表面,该复合膜的光滑表面更容易使被截留金属离子向进料液扩散,有效地缓解了浓差极化。

Liu 等^[57]将热压法与原位生长相结合,制备出沸石咪唑酯框架材料(ZIF-8)/PPS 纤维膜。作者通过控制 ZIF-8 原位生长的时间来调节其在膜内的分布,从而改善了油水分离效果。实验结果表明,当 ZIF-8 原位生长时间为 10 h 时,ZIF-8/PPS 纤维膜的接触角为 72.5° ,孔隙率达到 52.3%,纯水通量为 $12\ 351\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。次年,Wang 等^[58]制备了另一种耐恶劣环境的 ZIF-8/PPS 复合膜,能够在恶劣环境下实现高效油水分离和空气过滤。该复合膜具有荷叶状乳突结构,能充分发挥 PPS 与无机沸石材料的优势,在强酸强碱条件及超过 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温环境中表现出智能可切换的超疏水/疏油特性及 $\text{PM}_{2.5}$ 净化性能。实验表明,该仿生膜在油水分离中通量可达 $28\ 569.4\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,分离效率达 99.932%,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的截留效率达 99.5%。值得注意的是,这种 ZIF-8@PPS 膜即使经过极端环境下的多次循环测试,仍然保持优异的分离和过滤性能。

Zhang 等^[59]将 PDA 改性的 HKUST-1 纳米复合材料(mHKUST-1)添加至 PA 功能层中,制备出带负电荷的新型纳滤膜。优化后的 PPS/mHKUST-1/PA 膜表现出优异的渗透性能,达到 $27.35\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$,是 PPS/PA 膜的两倍。同时,在 4 bar 压力下对 MgSO_4 和 Na_2SO_4 的截留率分别达到 91.67% 和 90.06%。此外,PPS/mHKUST-1/PA 膜在长期循环中过滤性能保持稳定。结果证明,这种膜改性方法在脱盐领域具有广阔的应用前景。

Li 等^[60]基于 Pickering 乳液聚合法制备了一种改性凹凸棒石(ATP-PS)。之后,以 1-氯萘和 DBS 作为混合稀释剂,以 ATP-PS 作为添加剂制备了 PPS 疏水多孔膜。结果表明,当 ATP-PS 的添加量占 PPS 基膜总质量的 0.8% 时,PPS 膜展

出很强的疏水性和对有机溶剂的亲水性,正丁醇通量达到 $106.964\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$ 。作者又通过在 PPS 膜表面共沉积鞣酸(TA)和 ATP-PS 制备了具有 ATP-PS 选择层的 PPS/ATP-PS/TA 纳米复合膜。这种纳米复合膜的正丁醇通量为 $61.291\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$,对 MB 染料的最大截留率达到 99.82%。这些结果表明,PPS/ATP-PS/TA 纳米复合膜在有机染料废水的过滤中具有潜在的应用价值。

Tian 等^[61]利用亲水性的氨基功能化铝基金属有机框架(MOF)材料($\text{UiO}-66\text{-NH}_2$),制备出了 $\text{UiO}-66\text{-NH}_2$ /羟基化聚苯硫醚(h-PPS)复合膜,成功实现了超亲水改性。同时,该复合膜拥有水下超疏油特性,对甲苯、己烷、二氯甲烷和四氯化碳的水下油接触角均超过 150° ,增强了润湿选择性并降低了油滴的黏附,从而能有效分离多类油包水乳液。该复合膜展现出优异的渗透通量(对无表面活性剂负载的甲苯乳液可达 $7\ 638.1\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$)和分离精度(油截留率 99.1%)。此外,这种复合膜在极端环境下也能保持稳定,因此可用于水中有机污染物的降解:在可见光照射 120 分钟条件下,亚甲基蓝的降解效率达到 85.7%。这种复合膜在复杂工况的废水处理领域中展现出巨大潜力。

Bian 等^[62]采用浸渍拉伸法合成了 AF/PPS 复合膜。该方法在 AF 支撑体两侧涂覆 PPS 分离层,相较于纯 PPS 膜(拉伸强度 6.7 N),所制备的复合膜拉伸强度提升至 445 N,其纯水通量达到 $888.15\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$,较纯 PPS 膜提高 20.7 倍。进一步通过 TIPS 刮膜法,在玻璃纤维编织布(GFWF)表面均匀涂覆 PPS 膜,成功制备出兼具优异力学性能的复合膜。研究发现:当铸膜液中 DPK 占比 25% 时,GFWF 支撑的复合膜拉伸强度达 207.84 N,较 PPS 膜提升 31 倍;当 DPK 含量为 10% 时,PPS/GFWF 微滤膜的纯水通量为 $75.3\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$,较纯 PPS 膜提高 1.75 倍。

二维 MOF 纳米材料能够有效传输水分子,广泛用于染料废水的处理。Yin 等^[63]采用真空辅助自组装方法将两种纳米片,四(4-羧基苯基)卟啉铜(II)(CuTCPP)和双(咪唑)乙酸锌[Zn(Bim)(OAc)]整合到 PPS 超滤膜上,制备出一种稳定的 CuTCPP/Zn(Bim)(OAc)复合膜。这种复合膜对藏红花 T(ST)、铬黑 T(BT)、罗丹明 B(RB)、结晶紫(CV)和 CR 这五种染料的截留率分别为 95.8%、98%、97.8%、97.2% 和 98.8%,同时具备优异的耐酸性、良好的抗污染性和稳定性。

2.1.2 电池隔膜

Qian 等^[64]在基于 SPEEK 的质子交换膜中引入具有刚性主链的磺化聚苯硫醚(SPPS),制备出具有高质子传导率和尺寸稳定性的复合膜。在 $60\sim150\text{ mA}/\text{cm}^2$ 范围内,基于 SPEEK/SPPS 复合膜的电池展现出优秀的电压效率(92.5%~75.0%)和能量效率(90.0%~74.2%)。经过多次充放电循环后,该平板膜表现出优异的结构稳定性、高电荷容量保持率和良好的耐久性。

Kim 等^[65]利用含有 SiO_2 纳米粒子的 PPS/ SiO_2 共混物制备出了机械强度和化学稳定性极佳的高效多孔结构 PPS 膜,

并已通过电化学行为稳定性对其用作锂离子电池(LIB)隔膜的适用性进行了系统的评价。值得特别说明的是,由于PPS材料本身的特性,在具有高孔隙率的同时,该PPS膜仍有良好的机械稳定性(特别是在高温环境下)。总体而言,这种多孔PPS隔膜能够满足高效率锂离子电池的性能要求,是具有重要应用前景的候选材料。

Zhu等^[66]制备了一种基于耐高温PPS纤维与细菌纤维素(BC)纳米纤维的新型复合隔膜(BC/PPS)。实验发现,BC纳米纤维能有效调节复合隔膜的孔径结构。该BC/PPS复合隔膜展现出优异的热稳定性、良好的电解液润湿性及突出的离子电导率。相较于商用隔膜,采用该复合隔膜的电池表现出更佳的倍率性能和更稳定的循环性能。这项研究开发的BC/PPS复合隔膜可以为高功率锂离子电池隔膜的发展提供重要技术支撑。

张马亮等^[67]通过PA膜溶液涂覆修饰PPS超细纤维膜的方式,构建了PA/纳米结构聚苯硫醚(n-PPS)微纳米复合纤维隔膜。实验表明,当PA的质量分数为11%时,PA/n-PPS隔膜的孔隙率最大并且膜孔结构均匀,电化学性能最佳;在0.2C倍率条件下,隔膜组装的电池初始放电比容量为340 mA·h/g,并且经过100次循环,放电比容量几乎无波动,放电效率接近100%,表现出极佳的循环稳定性。

2.2 纤维领域

随着 Society 对空气质量的要求不断提高,工业除尘标准也变得愈发严格,除尘技术成为大气污染控制的关键环节。PPS纤维依靠独特的耐热性、化学稳定性和可设计性,成为高温苛刻环境下的不可替代材料。近几年,研究者在高温除尘领域取得了突破性进展。

Chen等^[68]系统研究了纺丝参数对PPS纤维形貌的影响,在最佳工艺条件(纺丝距离6 mm、温度310℃、电压35 kV)下获得了平均直径1.28 μm的PPS纤维。分析了纺丝电压对纤维结晶度与热稳定性的影响规律,同克重对比实验证明,所制备的186 g/m²PPS纤维过滤效率高达99.95%,显著优于商用防尘滤袋。该研究旨在为静电纺丝PPS纳米纤维的绿色工业化制造与应用提供新思路。

刘强飞等^[69]在PTFE/PPS针刺毡表面涂覆了不同质量分数的芳纶纳米纤维(ANF)分散液,成功制备了PTFE/ANF/PPS复合针刺毡。通过对各项性能进行分析发现,ANF分散液在内部呈现微纳结构,使PPS复合针刺毡对不同粒径的颗粒物过滤效率明显提高,特别是对于粒径为1.25 μm颗粒物的过滤效率提高了37.9%。另一方面,这种分散液对针刺毡的热稳定性和力学性能没有造成影响,阻力也仅有少量增加。针刺毡表面的纳米纤维膜在过滤过程中发挥了主要作用,基本实现了高效低阻效果。

Yang等^[70]报道了一种具有优异耐高温抗氧化性能的OPPS纤维,该纤维通过将PPS分子链中的硫醚基氧化为亚砷基和砷基,并进行分子链间交联来实现性能的提升。所制备的氧化程度为20%的OPPS(OPPS-20)纤维在高温强氧化

剂环境中展现出优秀的结构稳定性:经320℃高温老化12 h后,OPPS-20无纺滤材仍保持99.95%的高粉尘过滤效率,相应阻力仅为24 Pa;在60%硝酸溶液中老化12 h后,其过滤效率与阻力分别为99.96%和29 Pa。研究表明新型OPPS纤维在恶劣环境分离过滤领域具有广阔应用前景。

Zhang等^[71]通过在基基层混纺超细PPS纤维,制备出新型PTFE覆膜不对称复合滤袋。测试表明:相较于未覆膜/未混纺超细纤维的滤料,新型膜层压-超细聚苯硫醚纤维梯度复合滤材(M-PPSF-S)虽阻力略有增加,但使用寿命显著延长,除尘效率提高且清灰性能更优。经燃煤电厂烟气中间实验验证,M-PPSF-S滤料在5个月持续运行中保持良好性能。M-PPSF-S滤料为开发低成本、高性能的高温烟气滤料提供了全新思路。

Zhao等^[72]运用湿法解离与干法热加固技术,将短切对位芳纶(PPTA)纤维和自制的PPS超细纤维相结合。得到的PPTA/PPS超细纤维毡具有高过滤精度和长期热稳定性,其对PM0.3, PM0.5, PM1.0, PM2.5, PM5.0和PM10的过滤效率分别达89.02%, 97.34%, 99.85%, 99.99%, 100.00%和100.00%,经20次循环后过滤效率均保持在98%以上。该纤维毡在230℃环境中放置48 h或在强酸强碱溶液中浸泡48 h后,PM2.5过滤效率仍保持在99.73%以上,表现出优异的热稳定性和化学稳定性。与此同时,其结构稳定性同样突出,拉伸强度和撕裂指数分别达32.93 N/cm和22.77 mN·m²/g。这种综合性能卓越的PPS/PPTA超细纤维毡为工业高温烟尘精细化治理提供了新的发展方向。

Peng等^[73]采用氧化还原沉淀法成功制备了兼具高效除尘与低温二噁英脱除功能的锰-铈-钴混合氧化物(Mn-Ce-Co-Ox)/PPS催化滤料。实验表明:200℃工况下,Mn-Ce-Co-Ox/PPS对二噁英的分解率达78.0%,一氧化氮转化率达96%,催化剂中毒后仍保持88.6%的二噁英脱除率。此外该催化滤料对1 μm以下颗粒物可实现完全脱除,且过滤阻力较低。这种高效节能的催化滤料在烟气污染治理领域展现出广阔应用前景。

2.3 工程塑料-金属复合结构领域

在新能源汽车的电池部件和航空结构件中,PPS得到更加广泛的应用。凭借金属/塑料复合技术的成熟,PPS逐渐实现从非结构件向主承力构件的转型:新能源汽车领域通过铝框架/PPS绝缘层共注塑成型结构实现电池箱体一体化集成,并运用导电PPS-铝流场板界面焊接技术制造氢燃料电池双极板;航空航天领域则采用PPS蒙皮、铝骨架铆嵌复合结构制备机翼扰流板,以及开发钛合金-PPS微注塑连接件航发传感器支架。在此基础上,近年研究通过热压、注塑成型、超声波焊接、摩擦焊接等热熔连接技术提升PPS和金属的界面结合强度^[74],以进一步拓宽应用范围。

Li等^[75]采用喷砂处理与去离子水处理的协同作用对铝表面进行改性,制备出具有轻质高界面结合强度的铝合金/PPS复合结构。当去离子水与铝反应生成的AlOOH质量分

数为23.6%时,其结合强度达到32.3 MPa,较处理前提升2.3倍。经过退火处理,PPS结晶度提高至51.9%,PPS-铝合金界面结合强度达到35.6 MPa。这种复合结构的结合强度可满足大多数工程需求,在航空航天和汽车领域具有重要应用价值。

Wang等^[76]开发了一种简化摩擦点焊技术,用于连接AA5052铝合金与GF/PPS板材。探究了表面处理方法和工艺参数对焊接过程和机械强度的影响。通过对结合界面和断裂表面进行分析,证明该接头的键合机制是在接合面中心形成微观锯齿状结合界面,这种结构与铝和GF/PPS相互渗透产生的宏观互锁效应共同实现了优质接合。

Huang等^[77]通过在商用6063T5铝合金表面进行阳极氧化及后续蚀刻处理,制备了具有不同孔间距和孔径的多孔阳极氧化铝(PAA)膜层,并实现了GF/矿物填充PPS与铝合金的直接连接。结果表明,接头剪切强度随蚀刻时间呈现先升后降的趋势。铝合金-PPS接头的最大接合强度约为21.2 MPa,达到理论极限值(约25.5 MPa)的82%。

Zhao等^[78]采用不同时间的温和氧化和硬氧化工艺,在商业6063铝合金上制备了PAA薄膜,并进行了蚀刻处理。随后通过注塑成型实现PPS与铝的直接键合,系统研究了铝合金-PPS接头界面结合强度与铝氧化时长的关联性。研究发现:阳极氧化铝(AAO)薄膜的孔隙率、纳米孔直径及表面润湿性显著影响铝合金-PPS复合结构的结合强度。当温和阳极氧化(MA)、硬质阳极氧化(HA)及刻蚀处理时长分别设定为30、30和60 min时,获得最大黏接强度25.2 MPa,约为基体材料剪切强度的77%。同年,他们^[79]通过恒电流阳极氧化及扩孔处理制备了铝合金试样。实验表明,当电流密度为120 A/m²、氧化时间为30 min时,铝表面的黏接强度能达到11.7 MPa。通过AAO膜的扩孔处理,黏接强度提升至25.0 MPa。这些研究对发展高强度铝合金-PPS复合材料的直接黏接技术具有重要意义。

Li等^[80]探讨了采用回填式摩擦塞焊工艺连接的AA6061铝合金与CF/PPS之间异种接头的微观组织与力学性能。结果表明,AA6061与CF/PPS的连接主要归因于机械咬合和黏结的综合作用。研究发现,在1 200 r/min下产生的搭接剪切接头具有最高的峰值载荷,同时具有更厚的黏结层,表现出更强的机械互锁效应。

Yu等^[81]采用磷酸和PPS阳极氧化处理的6063铝合金通过超声波焊接方法进行连接。结果表明,未处理的6063铝合金-PPS超声波焊接接头的剪切强度最大只能达到1.41 MPa;当6063铝合金表面经磷酸阳极氧化处理后,接头剪切强度可达16.92 MPa,约为未阳极氧化时的12.6倍。超声波焊接声流效应产生的声压梯度使PPS嵌入多孔结构中,从而实现了6063铝合金-PPS的良好结合。

Xu等^[82]采用超声辅助的氯化铁蚀刻法在不同温度下对AA2024铝合金表面进行处理,以增强PPS与AA2024铝合金界面处的拉伸剪切强度。当采用温度为70℃和能量为

64 800 J的超声波蚀刻时,AA2024-PPS接头的强度达到39.5 MPa。此外,通过 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH103)和KH550的涂层处理,基于化学吸附作用进一步提升了结合强度,最终实现了52.7 MPa的最大拉伸剪切强度。首次将原位生长工艺应用于金属-聚合物接头的构建,为提升金属-聚合物界面结合强度提供了创新方法。

Du等^[83]通过对钛合金TC4表面进行阳极氧化处理,在其表面形成具有1~2 μm 裂纹结构的氧化层,随后通过直接注塑成型工艺将钛合金与PPS塑料结合。当阳极氧化温度为90℃、氧化时间为30 min时,TC4-PPS复合材料的界面结合强度达到最大值16.8 MPa。之后,他们采用注射成型直接连接技术实现了钛合金与PPS复合组件的接合^[84]。通过对钛合金表面进行喷砂、阳极氧化、蚀刻和退火处理,在表面形成了均匀分布的爪状纳米结构。该处理还提高了表面粗糙度,展现出仅10.7°的接触角,表现出优异的润湿性。拉伸试验显示接合强度达33.5 MPa,对剥离试样残留元素的分析表明,复合组件的失效形式表现为聚合物内聚破坏,验证了其优异的接合效果。这些研究对拓展钛合金与PPS复合材料的工程应用具有重要意义。

3 结语与展望

改性能够让PPS在保持优良综合性能的同时弥补其他不足。近些年有关PPS的改性研究发展迅猛,但也仍有许多问题需要进行更深层次的研究,以图更广泛、更深入地拓展PPS的应用领域。

(1)纤维改性体系在增强拉伸弯曲性能的同时会不可避免地降低材料的抗冲击性,且应用范围较窄;而PPS合金加工难度较大,且对机械性能提升有限。因此,未来PPS的增强增韧改性需要考虑利用不同添加剂的协同作用,在提升拉伸和弯曲强度的同时保证材料的冲击强度,拓宽应用领域并降低成本。

(2)目前使用的高性能导热填料价格昂贵,改性工艺复杂,且缺乏环境适应性。未来的研究方向应聚焦于开发低成本填料,减少能耗和废料率,并提高长期稳定性。

(3)国内近几年对低介电改性的研究相对较少。当前5G等领域对低介电性能要求较高,填料改性起到的作用有限,而微发泡工艺尽管效果显著,但成本较高,难以实现工业化生产。因此,未来的发展主流可能仍然为低介电填料改性,采用纳米填料和复合填料体系来有效降低介电常数,并平衡介电性能和力学性能。

(4)PPS膜已应用于许多领域,如油水分离、海水淡化、小有机分子的分离与催化降解、吸附、电解槽和电池隔膜等。然而,仍有许多缺陷限制了各种类型的PPS膜进一步地工业化或广泛应用,例如机械性能差、选择性和渗透性低以及膜操作稳定性差,这都是未来需要解决的问题。PPS中空纤维膜和超细纤维膜适合工业发展,因此应更加侧重这方面的研究。

(5)PPS纤维滤料已成为高温烟气过滤领域的核心材料。

未来需要在维持高效过滤性能的同时,兼顾更低阻力以及极端工况下的长使用寿命,以适应更加复杂的应用环境。

此外,对于PPS在疲劳条件下或在其他恶劣环境中的长期热老化效应,目前还缺乏足够的了解,对PPS基复合材料的机械降解和疲劳性能也需要更多的研究。毫无疑问,随着各项新兴领域的发展,无短板的“六边形战士型”PPS改性材料的开发会有更大的突破,并得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] RAHATE A S, et al. Reviews In Chemical Engineering, 2013, 29 (6):471–489.
- [2] CHEN G W, et al. Composites Part B:Engineering, 2021, 209. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108553.
- [3] 张佳新,等.复合材料科学与工程,2020(1):76–81.
ZHANG Jiaxin, et al. Composites Science and Engineering, 2020 (1):76–81.
- [4] 丁大有,等.中国塑料,2020,34(8):50–56.
DING Dayou, et al. China Plastics, 2020, 34(8):50–56.
- [5] HU J Q, et al. Composites Part B:Engineering, 2020, 191. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107966.
- [6] 赵乐,等.工程塑料应用,2022,50(1):72–77.
ZHAO Le, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1): 72–77.
- [7] SIDIM G, et al. Polymer Composites, 2025, 46(1):749–760.
- [8] LI N, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2024. DOI:10.1177/07316844241232960.
- [9] YUAN Z, et al. The Journal of Supercritical Fluids, 2022, 189. DOI:10.1016/j.supflu.2022.105731.
- [10] KIM Y D, et al. Polymer Korea, 2023, 47(1):42–48.
- [11] TIWARI S, et al. Polymer Composites, 2024, 45(13): 11 845 – 11 859.
- [12] 尹立,等.塑料工业,2020,48(1):127–131.
YIN Li, et al. China Plastics Industry, 2020, 48(1):127–131.
- [13] JUNG K H, et al. Macromolecular Research, 2020, 28(3): 241–248.
- [14] PAN S Y, et al. Additive Manufacturing, 2021, 47. DOI:10.1016/j.addma.2021.102247.
- [15] KIM J, et al. Carbon, 2024, 219. DOI: 10.1016/j.carbon.2024.118814.
- [16] WANG Z J, et al. Journal of Process Mechanical Engineering, 2024. DOI:10.1177/09544089241293888.
- [17] ASLAN C, et al. Polymer Bulletin, 2024, 81(6):4 969–4 992.
- [18] 沈澄英,等.现代塑料加工应用,2021,33(2):19–21.
SHEN Chengying, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(2):19–21.
- [19] NARA S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(4). DOI:org/10.1002/app.49994.
- [20] KIM D K, et al. Materials Chemistry and Physics, 2021, 273. DOI: org/10.1016/j.matchemphys.2021.125100.
- [21] 易成鸿,等.复合材料学报,2024,41(11):5 946–5 957.
- YI Chenghong, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41 (11):5 946–5 957.
- [22] RANGARAJAN R, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2025, 36(1). DOI:10.1002/pat.70058.
- [23] 刘晨珺,等.中国塑料,2024,38(12):43–47.
LIU Chenjun, et al. China Plastics, 2024, 38(12):43–47.
- [24] BHALWANKAR M, et al. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2023, 62(3):260–269.
- [25] WANG C Y, et al. Macromolecular Chemistry and Physics, 2022, 223(15). DOI:10.1002/macp.202200149.
- [26] XU K, et al. Polymer for Advanced Technologies, 2024, 35(4). DOI:10.1002/pat.6363.
- [27] GARMABI M M, et al. Progress in Additive Manufacturing, 2025, 10(4):2 397–2 409.
- [28] YAO S J, et al. Composites Science and Technology, 2025, 269. DOI:org/10.1016/j.compscitech.2025.111240.
- [29] GOZDE S, et al. AIP Conference Proceedings, 2020, 2205(1). DOI:org/10.1063/1.5142948.
- [30] ALTAY L, et al. High Temperatures-High Pressures, 2021, 50(4/5): 415–432.
- [31] ZHANG L, et al. Nanomaterials, 2022, 12(19). DOI:org/10.3390/nano12193543.
- [32] SHI Y, et al. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 99:239–250.
- [33] KIM M, et al. Polymer Testing, 2022, 108:107517.
- [34] KIM M, et al. European Polymer Journal, 2023, 201(000). DOI: org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112584.
- [35] KIM M, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33:2 756–2 763.
- [36] KIM M, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30:9 337–9 342.
- [37] KIEPFER H, et al. Applied Thermal Engineering, 2024, 236. DOI: org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121581.
- [38] CHO Y, et al. Polymer Testing, 2024, 141. DOI:org/10.1016/j.polymertesting.2024.108633.
- [39] 王晓芳,等.合成树脂及塑料,2024,41(3):15–20.
WANG Xiaofang, et al. China Synthetic Resin and Plastics, 2024, 41(3):15–20.
- [40] YANG X T, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2017, 101:237–242.
- [41] HUANG S Q, et al. Composites Part B:Engineering, 2020, 201. DOI:org/10.1016/j.compositesb.2020.108334.
- [42] HUANG S Q, et al. Composites Science and Technology, 2021. DOI:org/10.1016/j.compscitech.2021.109073.
- [43] CAO B, et al. Molecules, 2022, 27(22). DOI: org/10.3390/molecules27228066.
- [44] ZHAO J X, et al. Advances in Polymer Technology, 2023. DOI: 10.1155/2023/7484634.
- [45] YAO S J, et al. Composites Communications, 2023, 37. DOI:org/

- 10.1016/j.coco.2022.101436.
- [46] ZHANG L S, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(14):5 850–5 863.
- [47] CHEN D Y, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(38):15 511–15 524.
- [48] ATTIAS R, et al. *Joule*, 2019, 3(1):27–52.
- [49] GU J W, et al. *RSC Adv*, 2014, 4(42):22 101–22 105.
- [50] MA C C M, et al. *Polymer Composites*, 1992, 13(6):435–440.
- [51] DÍEZ-PASCUAL A M, et al. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, 131(3):605–614.
- [52] LIU Z J, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 436. DOI: 10.1016/j.ccej.2022.135273.
- [53] 贾康, 等. *化工进展*, 2020, 39(10):4 102–4 110.
JIA Kang, et al. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(10):4 102–4 110.
- [54] KOU X H, et al. *Separation and Purification Technology*, 2021, 275. DOI:org/10.1016/j.seppur.2021.119124.
- [55] ZHANG M L, et al. *Reactive and Functional Polymers*, 2021, 160. DOI:org/10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104842.
- [56] GAO Y, et al. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(20):11 736–11 748.
- [57] LIU W L, et al. *Membranes*, 2022, 12(10):1 017.
- [58] WANG W X, et al. *Journal of Membrane Science*, 2023, 685. DOI: org/10.1016/j.memsci.2023.121885.
- [59] ZHANG Y X, et al. *Polymer*, 2022, 253. DOI: org/10.1016/j. polymer.2022.124988.
- [60] LI C, et al. *Polymer Bulletin*, 2024, 81(1):969–993.
- [61] TIAN S W, et al. *Journal of Membrane Science*, 2023, 687. DOI: org/10.1016/j.memsci.2023.122029.
- [62] BIAN Q Q, et al. *Materials Today Communications*, 2023, 37. DOI:org/10.1016/j.mtcomm.2023.106960.
- [63] YIN Y Y, et al. *Reactive and Functional Polymers*, 2024, 202. DOI:org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105971.
- [64] QIAN P H, et al. *Materials Chemistry Frontiers*, 2021, 5:8 171–8 182.
- [65] KIM M, et al. *Materials Today Advances*, 2021, 12. DOI: org/ 10.1016/j.mtadv.2021.100186.
- [66] ZHU C Q, et al. *Composites Communications*, 2021, 24. DOI:org/ 10.1016/j.coco.2021.100659.
- [67] 张马亮, 等. *天津工业大学学报*, 2022, 41(3):15–19.
ZHANG Maliang, et al. *Journal of Tiangong University*, 2022, 41 (3):15–19.
- [68] CHEN Q Q, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(11): 2 887–2 894.
- [69] 刘强飞, 等. *纺织学报*, 2021, 42(10):47–52.
LIU Qiangfei, et al. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(10): 47–52.
- [70] YANG G F, et al. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14 (44):50 225–50 234.
- [71] ZHANG B, et al. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 459. DOI: org/10.1016/j.jhazmat.2023.132078.
- [72] ZHAO P, et al. *Reactive and Functional Polymers*, 2023, 188. DOI:10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105605.
- [73] PENG Y Q, et al. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(57):120 355–120 365.
- [74] 刘孟珂, 等. *高分子通报*, 2024(11):1 535–1 549.
LIU Mengke, et al. *Polymer Bulletin*, 2024(11):1 535–1 549.
- [75] LI X P, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2021, 224. DOI:org/ 10.1016/j.compositesb.2021.109204.
- [76] WANG B, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66. DOI:10.1016/j.jmapro.2021.04.047.
- [77] HUANG H J, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 428. DOI:org/10.1016/j.surfcoat.2021.127896.
- [78] ZHAO W, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 483. DOI:org/10.1016/j.surfcoat.2024.130773.
- [79] ZHAO W, et al. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2024, 130. DOI:org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103632.
- [80] LI H, et al. *Welding in the World*, 2022, 66:923–933.
- [81] YU W Y, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51: 241–248.
- [82] XU L Y, et al. *Surfaces and Interfaces*, 2025. DOI: 10.1016/j. surfm.2025.106366.
- [83] DU M H, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 433. DOI: org/10.1016/j.surfcoat.2022.128132.
- [84] DU M H, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26:3 383–3 394.