

聚苯硫醚的产业现状及其亲水改性技术研究进展

崔洁¹ 邓杭军² 戚栋明³ 周贵阳² 陈涛¹

1. 浙江理工大学 纺织科学与工程学院(国际丝绸学院), 浙江 杭州 310016;
2. 浙江新和成特种材料有限公司, 浙江 绍兴 312369;
3. 现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室), 浙江 绍兴 312030

摘要:聚苯硫醚(PPS)是一种高性能的特种树脂材料,具有良好的热稳定性和力学性能。其化学结构以苯环和硫原子交替连接为特征,由于其中缺乏亲水性基团,故 PPS 在纺织、膜分离和电子等领域应用受限。概述 PPS 纤维的基本特性与产业现状,总结当前 PPS 亲水改性的主要方法,从等离子体处理、物理改性、化学改性和共混改性这 4 个方面展开阐述,探讨现有改性技术的不足及未来发展方向,强调绿色环保和持续创新对拓展 PPS 的应用具有重要意义。

关键词:聚苯硫醚(PPS);产业现状;亲水改性;等离子体处理;物理改性;化学改性;共混改性

中图分类号:TQ 342;TB 324

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)05-0033-07

Industrial status of polyphenylene sulfide and research progress of its hydrophilic modification technology

Cui Jie¹, Deng Hangjun², Qi Dongming³, Zhou Guiyang², Chen Tao¹

1. College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310016, Zhejiang, China;
2. Zhejiang Xinhecheng Special Materials Co., Ltd., Shaoxing 312369, Zhejiang, China;
3. Zhejiang Provincial Innovation Center of Advanced Textile Technology (Jianhu Laboratory), Shaoxing 312030, Zhejiang, China

Abstract: Polyphenylene sulfide (PPS) is a high-performance special resin material with good thermal stability and mechanical properties. Its chemical structure is characterized by the alternating connection of benzene rings and sulfur atoms. Due to the lack of hydrophilic groups, PPS is limited in applications such as textiles, membrane separation, and electronics. The basic characteristics and industrial status of PPS fibers were outlined. The main methods for hydrophilic modification of PPS were summarized and elaborated from four aspects: plasma treatment, physical modification, chemical modification and blending modification. The shortcomings of existing modification technologies and future development directions were discussed. The importance of green environmental protection and continuous innovation in expanding the application of PPS was emphasized.

基金项目:浙江省“尖兵”研发攻关项目(2023C01094)

收稿日期:2024-11-12

作者简介:崔洁,女,2000年生,在读硕士研究生,主要研究方向为高性能纤维亲水改性,1056468711@qq.com

通信作者一:陈涛,教授,主要研究方向为聚合物基新材料、环保型纺织助剂、功能性纺织品,tao.chen@zstu.edu.cn

通信作者二:周贵阳,高级工程师,zgy@cnhu.com

Keywords: polyphenylene sulfide (PPS); industrial status; hydrophilic modification; plasma treatment; physical modification; chemical modification; blending modification

聚苯硫醚(PPS)是特种工程塑料第一大品种,在特种工程塑料中占据着顶端位置^[1]。根据分子结构的不同,PPS主要分为交联型和线型两大类。PPS被认为是继聚酰胺(PA)、聚甲醛(POM)、聚碳酸酯(PC)、聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)、聚苯醚(PPO)之后的第六大工程塑料,也是八大宇航材料之一,具有耐高温、耐酸碱、耐腐蚀、抗水解、抗 γ 射线及阻燃等特性^[2-3]。生产PPS聚合物的方法众多,主要有硫化钠法、硫磺法、硫化氢法及氧化聚合法等^[4]。

PPS分子链由苯环和硫原子交替排列构成^[5-7],其拥有规整的大分子结构和聚集态结构^[8-9]。PPS纤维力学性能优良,断裂伸长率不低于20%,断裂强度达4.0 cN/dtex,204℃条件下处理2h的收缩率为5%,加工性能良好^[10]。但PPS纤维也存在一些不足,如其分子结构高度对称且不含极性基团,故回潮率低,润湿性和吸附性差,这严重限制了PPS材料在众多领域的应用。

本文主要从PPS的产业现状及其亲水改性技术研究进展两方面展开论述,重点总结当前PPS材料亲水改性的主要方法,指出现有亲水改性技术的不足,并做出展望。

1 PPS纤维产业现状

当前,我国PPS纤维产业化发展势头良好,其生产企业主要集中在江苏、浙江、四川和辽宁等地。

PPS的研究始于20世纪90年代初,随后天津工业大学在PPS树脂及其共混纺丝方面取得了显著成果^[11]。接着,在众多专业研究院所的共同努力下,国内PPS纤维生产技术和产能显著提升,产品质量和性能达到国际先进水平,市场竞争力提高。近年,国产PPS纤维以短纤维为主,品种较单一,因此加快PPS纤维在超细、异形、改性和复合等方面的研发与应用是当前研究的重点。此外,为满足高温滤料等高端市场的需求,PPS纤维行业已将重心转向新产品的研发上。我国也在PPS树脂及其纤维的结构、性能及加工工艺等方面进行了深入探究,并取得了阶段性突破^[12]。

国外生产PPS产品的代表企业主要有大日本油墨(DIC)、东丽、索尔维、吴羽等,他们在PPS产品的生产、开发等方面均处于领先地位。国内企业近年在PPS产品开发方面也呈现出快速崛起的势头。新和成公司合成的超高相对分子质量PPS树脂,具有相对分子质量分布窄、纯度高、性能稳定等特点;其还开发出低氯级PPS产品,用于计算机(Computer)、通信(Communication)和消费类电子(Consumer Electronics)产品(简称3C产品)领域。帝斯曼在2016年与新和成合作成立了帝斯曼新和成工程材料有限公司,旗下的Xytron™产品被广泛应用于汽车、电子电器及质子交换膜燃料电池等领域。重庆聚狮基于多年的生产经验,可供应不同牌号的PPS纯树脂或粒料。表1归纳了部分PPS生产企业的基本信息和业务发展情况。

表1 部分PPS生产企业的基本信息和业务发展情况

Tab. 1 Basic information and business development of some PPS manufacturing enterprises

公司简称	总部地点	PPS业务发展情况
DIC	日本	1976年开始尝试对PPS进行改性,1987年实现了注塑级PPS的规模化生产
东丽	日本	世界第二大PPS产品供应商,拥有细旦化纺丝技术,产品涵盖常规型和细旦型
东曹	日本	1986年开始生产PPS,日本第一家一体化生产PPS及改性PPS树脂的厂家,产品种类丰富,性能优异
吴羽	日本	1987年开始自主研发直链型PPS树脂——Fortron PPS
索尔维	比利时	2015年以2.2亿美元完成对美国雪佛龙菲利普斯化工有限公司Ryton® PPS业务的收购
Fortron	美国	和日本吴羽展开技术合作,旨在提高产量和优化生产效率,推进PPS的生产和发展
INITZ	韩国	2013年合作成立,凭借改良的技术在PPS领域取得了显著成果
新和成	中国	2008年联合浙江大学研发高端PPS制造关键技术,2013年年产5000t的PPS项目正式投产,目前公司年产能2.2万t
安费尔	中国	主要生产2.2 dtex和1.5 dtex的PPS纤维

2 PPS 纤维应用前景及其存在的问题

PPS 纤维综合性能优异,已被广泛应用于纺织、

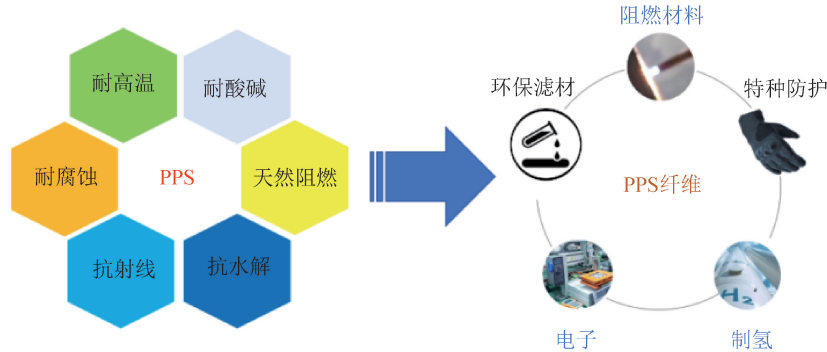


图 1 PPS 纤维的性能及其应用领域

Fig. 1 Performance of PPS fiber and its application

材料应能充分吸收染料。但 PPS 纤维表面难以被液体润湿,故染色过程中染料难以均匀地吸附在 PPS 纤维表面,进而导致染色效果无法满足耐火防辐射特种工况服对个性化和舒适性的要求。过滤时,过滤材料的亲水性会影响过滤效率。亲水性较弱的 PPS 材料在过滤过程中易形成滤饼,导致过滤阻力增大,进而过滤效率降低。此外,亲水性较弱的 PPS 材料对水性溶液的吸附能力相对较弱,这会影 响 PPS 材料的过滤和分离效果。在电解水制氢隔膜方面,PPS 织物极弱的亲水性使得电解槽内阻过大,电解池中电解质离子自由移动受阻,电解水制氢隔膜低内阻、高气密性无法实现,进而影响电解水效率和产氢纯度。在纤维纸领域,PPS 纤维因缺少亲水性基团而积累静电非常严重,其在水中不易分散且易絮聚,很难形成连续均匀的纤网。因此,对 PPS 进行亲水改性,可以显著改善其产品 在润湿性、分散性和吸附性等方面的不足,提升产品整体性能,扩大产品应用范围。

3 PPS 亲水改性方法

3.1 等离子体处理

近年来,等离子体技术在 PPS 亲水改性方面得到了广泛的应用。等离子体技术通过电离气体产生大量带电粒子和中性粒子,形成物体的第四态——等离子态^[13]。作为一种灵活、快速、环保的方法,等

汽车、电子和工业过滤等领域(图 1)。

但 PPS 纤维也存在润湿性差、分散性不足、生物相容性差和吸附性能低等问题,影响了其在各领域的应用。例如:染色时,为达到预期的染色效果,

离子体处理能够引发纤维表面分子链的断裂并生成自由基,进而通过后续反应引入—OH、—COOH 等亲水性基团。等离子体能量较低,一般只有几十电子伏特,具有作用强度高、穿透力小(处理深度为 5~50 nm)、反应温度低等特点,故其处理只涉及材料的表面,不影响基体的性能^[14-15]。经等离子体处理的材料,其表面会发生多重物理和化学变化,如产生刻蚀、形成致密交联层、引入含氧极性基团等,材料亲水性和染色性等明显改善^[16-17]。

Zhang 等^[18]基于空气等离子体处理的 PPS 薄膜制备了 PPS/玻璃纤维基布复合材料,发现处理后复合材料界面附着力和力学性能都有所提升。X 射线光电子能谱(XPS)分析发现,等离子体处理会导致 PPS 薄膜表面出现含氧极性基团,硫氧化物(S=O 和 O=S=O)含量增加,且处理前 PPS 薄膜的水接触角为 78.5°,处理后 PPS 薄膜的水接触角减小至 38.0°,说明含氧极性基团的引入提升了 PPS 薄膜的亲水性能。

Hong 等^[19]采用空气介质阻挡放电(DBD)等离子体技术,成功地将硫氧化物引入 PPS 材料表面。发现处理后的 PPS 材料表面水接触角明显下降,亲水性提升。此外研究还发现,空气 DBD 等离子体处理能有效提升 PPS 材料的吸附性能。

Xu 等^[20]通过大气等离子体处理 PPS 纤维,将空气中的 O₂ 和 H₂O 电离成活性化学基团—OH,并吸附到 PPS 纤维表面。研究发现:处理后的 PPS 纤

维表面水接触角急剧减小,从 112.4° 降至 33.1° ,表明其表面已由疏水性转变为亲水性;当处理时间增加到5 min时,PPS纤维表面的水接触角进一步减小至 9.6° 。

赵萌等^[21]研究发现,使用低温等离子体撞击PPS纤维表面后,纤维表面化学组成和结构发生了变化,表面生成了自由基。这些自由基能进一步生成特定基团,如 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{COOH}$ 等,使处理后的PPS纤维润湿性明显提升。

3.2 物理改性

PPS作为一种高性能材料,其产品被广泛应用于油水分离、离子电池、化学品过滤、高性能复合材料等领域^[22]。表面喷涂、浸渍和热压等物理方法是制备高分离效率PPS材料的常用改性方法。

王志杰等^[23]将PPS织物浸泡在壳聚糖溶液中制备亲水性的碱性水电解织物隔膜。研究发现,经壳聚糖改性后,PPS织物的水接触角降至 90° 以下,亲水性和气密性提升,水电解效能优于商用隔膜。

陈萌^[24]在PPS熔喷非织造材料表面物理涂覆纳米 SiO_2 和聚偏二氟乙烯(PVDF),得到具有多孔结构的 $\text{SiO}_2@$ PVDF/PPS复合隔膜。研究发现,该隔膜具有良好的润湿性和亲水性,吸液率达120.7%(高于商用隔膜),水接触角低至 16° ,且工艺简单,成本低。

Huang等^[25]采用简单易行的浸涂-热压法,将壳聚糖引入PPS纤维膜中,制备超亲水PPS纤维膜。研究发现,水滴能够在0.106 s内扩散并渗透PPS纤维膜,水接触角达到 0° ,水流量高达 $2\ 250\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,分离效率达99%。制备的超亲水PPS纤维膜还具有良好的防污性、抗菌性、可重复使用性和长期分离性,在含油废水净化领域具有广阔的应用前景。

Han等^[26]利用静电组装技术在亲水聚苯硫醚(h-PPS)膜上构建坚固、粗糙的 TiO_2 层,制备 $\text{TiO}_2@$ h-PPS膜,促进了膜的水化作用,并大幅提升了膜的亲水性和水下抗油润湿性。更重要的是,掺入 TiO_2 层后, $\text{TiO}_2@$ h-PPS膜实现了 $4\ 000\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的高水流量。此外,在强酸和强碱中, $\text{TiO}_2@$ h-PPS膜对油水乳状液的分离表现为长期的稳定性,故其在处理强腐蚀性乳状液方面具有广阔的应用前景。

Tian等^[27]通过原位静电自组装亲水性锆基金属有机框架(Zr-MOF),制备了 $\text{UiO-66-NH}_2@$ h-PPS

膜。其中, UiO-66-NH_2 晶体(由 ZrCl_4 和 $\text{NH}_2\text{-BDC}$ 合成)的引入为h-PPS膜基材构建了微/纳米级分层结构,使得水滴完全浸入仅需0.6 s。PPS膜从疏水状态转变为超亲水状态。

3.3 化学改性

化学改性也是对PPS材料进行亲水改性的常用方法,其通过有效引入亲水性基团,显著提升材料的亲水性。常见化学改性方法有化学反应、接枝共聚等。这些方法灵活性相对较高,可以根据特定的应用需求选择合适的改性策略。

李振环等^[28]先利用PPS与强氧化性酸的反应,在PPS多孔膜表面接枝 NO_3^- 、 ClO^- 、 SO_4^{2-} 、 SO_3^- 、 ClO_4^- 等亲水性基团,实现了疏水膜向亲水膜的转变;然后在其表面涂覆亲水性的纤维素和亲水改性后的无机纳米粒子,制备出截留效率高、水流量大、重复利用率高的超亲水PPS复合纤维膜。

李颖娜^[29]采用紫外光照射技术,将亲水性的丙烯酸单体接枝到PPS非织造材料表面,发现其水接触角能低至 24° ,改性效果显著。

张娇^[30]通过磺化反应向PPS大分子中引入亲水性磺酸基,以改善其亲水性。研究发现,经不同条件磺化后,所得样品的水接触角均下降到 0° ,水滴滴于磺化后的PPS样品表面即被吸收,样品被完全润湿。可见,磺化后PPS样品的亲水性得到明显改善,且磺化后样品存放数月后水接触角皆未上升,说明磺化反应不仅能明显改善PPS材料表面的亲水性,而且具有很好的时效性,磺化效果持久。

Zhang等^[31]在由 H_2O_2 、 CH_3COOH 和Amberlyst 15组成的氧化溶液中,对PPS膜进行氧化改性,如图2所示。利用氧化反应在PPS膜表面引入磺酰基 $-\text{SO}_2-$,形成PPS/O-PPS复合膜。研究发现,与PPS膜相比,复合膜具有良好的亲水性,水流量达 $112\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,还具有耐化学性和抗污染性等。

Wang等^[32]利用氯甲基化和季胺化反应对PPS膜进行改性,制备亲水性PPS微孔膜。从傅里叶变换红外光谱(FTIR)、XPS和能量色散X射线光谱(EDS)表征中可以发现,季铵盐通过共价键成功接枝到PPS膜上。与PPS膜相比,所得改性膜孔径减小,孔隙率降低,截留率提高;改性膜的亲水性显著提升,水流量达 $168.940\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;抗菌性也得到大幅提高。

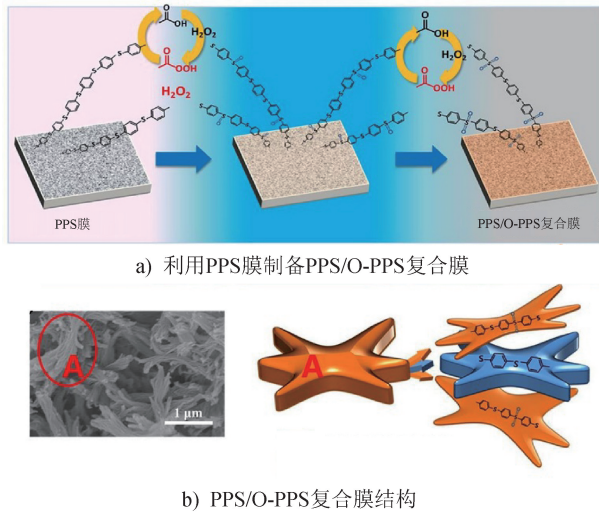


图 2 PPS/O-PPS 复合膜
Fig. 2 PPS/O-PPS composite membrane

Gao 等^[33]利用硝酸对 PPS 膜进行改性,在 PPS 膜表面引入大量亲水性基团,如—SO—、—SO₂—、—NH₂、—NO₂ 等。研究发现,当处理温度为 50 ℃ 时,改性膜具有超亲水性,水接触角为 0°,水通量达 154.95 L/(m²·h)。改性过程中,膜结构未被破坏。改性后,膜具有良好的耐酸碱腐蚀性能。

Wang 等^[34]提出了一种简单高效的制备超亲水性 PPS 膜的方法。其先对 PPS 膜表面进行氧化处理,然后通过紫外辐射引入胺基作为反应位点,最后利用界面聚合将含有亲水性基团的壳聚糖单体共价接枝到 PPS 膜表面,形成超亲水性涂层。研究发现,水滴接触超亲水性 PPS 膜表面即被迅速吸收,0.2 s 内即渗入,水接触角为 0°。该膜可作为隔膜运用在含 KOH 电解质溶液的碱性水电解槽中,产氢和产氧的纯度很高(分别达 99.88% 和 99.49%),优于商用 PPS 膜,且运行 120 h 后性能基本保持不变。可见,由该工艺制备的超亲水性 PPS 膜在电解水制氢领域具有广阔的应用前景。

杨光等^[35]首先将 PPS 织物隔膜氯磺化,然后将氯磺化后的 PPS 织物隔膜置于乙二胺溶液中进行氨化,再置于戊二醛溶液中处理,取出后与壳聚糖溶液反应,最终制得 PPS 织物型亲水隔膜。该膜具有良好的离子传导能力,使 PPS 隔膜应用于水电解领域成为可能。

Zhang^[36]先使用浓硫酸对 PPS 织物进行磺化,然后在 50 kW/(s·m²) 的强度下进行等离子体处

理,得到水电解用 PPS 织物。XPS 结果显示,PPS 纤维表面含有亲水性基团。将改性后的织物浸泡在 90 ℃、质量分数为 30% 的 KOH 溶液中,仅 8 s 织物表面即完全润湿,吸水性提高。

3.4 与其他聚合物共混改性

PPS 的分子结构呈致密分布的特征,分子链排列有序,这使得 PPS 的吸湿率很低,不仅无法达到理想的上染效果,还对特种工况服的防护效果与舒适性造成了不利影响。将 PPS 与含有亲水性基团的其他聚合物进行共混,能有效改善这类问题。

邢颖等^[37]选用聚丙烯酸(PAA)和纳米 SiO₂ 与 PPS 熔融共混,制备改性 PPS 纤维。由于 PAA 中含有—COONa、—COOH 等基团,因而 SiO₂ 与其共混后,SiO₂ 不会发生团聚现象。且共混后,改性 PPS 纤维吸湿率大幅提高,水接触角达 52.78°,吸湿回潮率也达到了 2.04%。

郭雪萍^[38]选用聚己二酰己二胺(PA66)、SiO₂ 和 PPS 进行熔融共混,制备了 SiO₂/PA66/PPS 纤维。研究发现,制备的纤维既维持了 PPS 纤维原有的力学性能和热稳定性,又将吸湿回潮率提高到 4.12%,满足特种工况服的舒适性需求。

申霄晓等^[39]将纳米 SiO₂、间苯二甲酸-5-磺酸钠(5-SSIPa)与 PPS 共混,利用双螺杆挤出机制备纳米 SiO₂/5-SSIPa/PPS 共混母粒。由于 5-SSIPa 的加入,SiO₂ 的团聚现象被打破,SiO₂ 的分散性和相容性提高。借助 SiO₂ 的表面吸附作用以及与 5-SSIPa 中亲水性基团的协同作用,PPS 的吸湿性改善效果显著优于单独使用 SiO₂ 或 5-SSIPa 的改善效果。

Ren 等^[40]以双卤代单体与硫化钠为原料,在高压下通过亲核取代聚合反应,合成了一系列侧链上羧基比例不同的(1,4-苯硫醚)-聚(2,5-苯硫醚酸)共聚物(PPS—COOH)。其合成路线如图 3 所示。FTIR 结果证实已成功聚合,且研究还发现共聚物的水接触角降低到 73.2°,与纯 PPS 相比亲水性有所改善。

Yan 等^[41]将砜、醚、酮、亚胺和酰胺等极性基团偶联到 2 个对氯苯中,通过氯胺化和酸酐胺化反应生成体积庞大的极性单体,再通过共聚将单体引入 PPS 主链中,增强了极性并增大了链间空间,突破了 PPS 的亲水性局限。研究结果显示,改性后 PPS 的水接触角降低到 68.6°,且具有更好的细胞相容性。

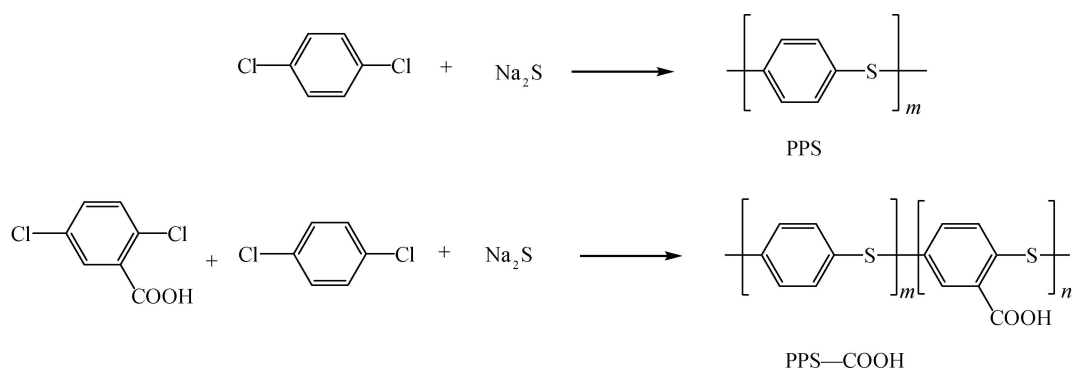


图3 共聚物 PPS—COOH 的合成路线

Fig. 3 Synthesis route of copolymer PPS—COOH

4 不足与展望

尽管提高 PPS 亲水性的方法多样,但在实际改性时,许多方法可能导致 PPS 物理性能下降。通过表面涂覆和等离子体处理获得的亲水改性效果,会经长时间的使用后有所减弱,进而导致材料的稳定性和实用性下降。此外,化学接枝和共聚成本较高,这将影响中小型企业采取这些改性方法的可能性,进而影响其大规模应用。还有某些化学改性剂在处理过程中会对环境造成影响。

未来,PPS 的亲水改性将主要集中在寻找更加环保的方法上,如:使用生物基材料或通过绿色化学途径对 PPS 进行亲水改性;开发新型亲水性添加剂,在提升 PPS 亲水性的同时保持或增强其力学性能;等等。探索智能型纤维也是未来发展的一个主流趋势,如通过温度或湿度响应的方式改变 PPS 的表面特性,充分发挥其在特定环境下的应用优势。此外,将亲水改性与抗菌、抗紫外线等功能结合,探索 PPS 在医疗、环保等领域的应用潜力,也是未来的一个发展方向。通过持续的研发和创新,PPS 改性技术将有望突破现有局限,推动材料科学和应用领域协同发展。

5 结束语

PPS 亲水改性的方法包括等离子体处理、物理改性、化学改性和共混改性等。通过在 PPS 表面涂覆亲水性涂层或引入亲水性基团,可使 PPS 达到超亲水状态,进而改善 PPS 的润湿性,拓宽 PPS 在耐

火防辐射特种工况服、电解水制氢隔膜、纤维纸等领域的产业化应用,市场前景极为广阔。随着 PPS 生产技术的不断提高,企业需要不断进行技术改造、升级和创新,提高产品的质量和性能。同时,PPS 的应用领域也在不断拓展,高分子复合材料、纳米改性材料等将进一步推动 PPS 行业的发展。未来,PPS 有望成为电子电器行业的首选材料,新能源和环保等领域将成为 PPS 的主流发展方向。

参考文献

- [1] YANG H L, REN H H, CHEN X L, et al. Hydrophilicity modification of polyphenylene sulfide: a comparative study on the introduction of Zr by physical blending and copolymerization [J]. *Polymer*, 2024, 312: 127648.
- [2] 陈好, 陈建文, 郑智宏, 等. PPS+PTFE 混纺针刺滤袋在燃煤电厂的应用分析 [J]. *产业用纺织品*, 2024, 42(6): 48-53.
- [3] 施永明, 石双友, 崔宁, 等. 聚苯硫醚纤维集合体的制备与应用进展 [J]. *纺织科学研究*, 2024, 35(9): 48-52.
- [4] 储海霞, 单玉华, 丁永红, 等. 硫化钠法合成 PPS 的溶剂和催化体系的考察 [J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2012, 24(2): 17-21.
- [5] 张子浩, 宋恒欢. 聚苯硫醚纤维制备及其应用现状 [J]. *科技与创新*, 2022(3): 166-168.
- [6] 谭策. 聚苯硫醚复合纤维膜的制备及其性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [7] 张伟元, 高原, 张马亮, 等. 聚苯硫醚分离膜材料研究进展 [J]. *膜科学与技术*, 2020, 40(6): 127-132.
- [8] YANG C, HAN N, HAN C Y, et al. Design of a Janus F-TiO₂@PPS porous membrane with asymmetric wettability

- for switchable oil/water separation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(25): 22408-22418.
- [9] ZHANG L S, CHEN D Y, JIN B H, et al. Ultrahigh electromagnetic wave transmitting polyphenylene sulfide microcellular foams based on molecular structure design for 5G communication [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62(14): 5850-5863.
- [10] 赵鹏. 对位芳纶/聚苯硫醚过滤材料的制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2023.
- [11] 张振方, 孔楠. 聚苯硫醚纤维的研究现状与应用[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2016, 33(2): 170-173.
- [12] 董余平, 秦加明, 王飞钻, 等. 聚苯硫醚(PPS)纤维发展现状与展望[J]. 中国环保产业, 2011(12): 12-16.
- [13] 韩津春, 李俊越, 张栋葛, 等. 纤维素织物疏水疏油功能整理研究进展[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(4): 9-20.
- [14] SAKE C. Overview on the surface functionalization mechanism and determination of surface functional groups of plasma treated carbon nanotubes[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2018, 48(1): 1-14.
- [15] LUO Y, HAN M Y, LI D D, et al. Plasma potential and ion energy characteristics in BP-HiPIMS discharge with double layer [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2024, 33(10): 105007.
- [16] HORI M, ZHANG Y, ISHIKAWA K. The mechanism of surface modifications of photoresist material in plasma etching nano processes [J]. ECS Meeting Abstracts, 2018(2): 1151.
- [17] SPIEGELMAN J, ALVAREZ D, RAMOS C, et al. Increased hydrophilicity of silicon surface through plasma treatment with hydrogen peroxide gas[J]. ECS Meeting Abstracts, 2021(1): 1028.
- [18] ZHANG S Y, HUANG G S, WANG X J, et al. Effect of air plasma treatment on the mechanical properties of polyphenylene sulfide/glass fiber cloth composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013, 32(11): 786-793.
- [19] HONG R, XU D X, WANG X J, et al. Effect of air dielectric barrier discharge plasma treatment on the adhesion property of sanded polyphenylene sulfide [J]. High Performance Polymers, 2016, 28(6): 641-650.
- [20] XU D H, YANG W J, LI X P, et al. Surface nanostructure and wettability inducing high bonding strength of polyphenylene sulfide-aluminum composite structure [J]. Applied Surface Science, 2020, 515: 145996.
- [21] 赵萌, 杨建忠. 空气氛围下低温等离子体处理改善聚苯硫醚纤维表面性能的研究[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(4): 39-44.
- [22] 闫晓东, 闫俊, 李红, 等. 低温等离子体接枝亲水改性聚苯硫醚织物[J]. 大连工业大学学报, 2024, 43(2): 141-146.
- [23] 王志杰, 杨光, 马含冰, 等. 壳聚糖改性聚苯硫醚碱性水电解隔膜的制备与性能研究[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(12): 1-6.
- [24] 陈萌. 硅树脂和二氧化硅陶瓷浆料涂覆改性聚苯硫醚无纺布电池隔膜 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2017.
- [25] HUANG H, LI Y, ZHAO L, et al. A facile fabrication of chitosan modified PPS-based microfiber membrane for effective antibacterial activity and oil-in-water emulsion separation[J]. Cellulose, 2019, 26(4): 2599-2611.
- [26] HAN N, YANG C, ZHANG Z X, et al. Electrostatic assembly of a titanium dioxide@hydrophilic poly(phenylene sulfide) porous membrane with enhanced wetting selectivity for separation of strongly corrosive oil-water emulsions [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(38): 35479-35487.
- [27] TIAN S W, ZHANG Y Q, SHA Q K, et al. *In-situ* electrostatic self-assembly superhydrophilic UiO-66-NH₂@h-PPS membranes for highly efficient oil-water emulsion separation [J]. Journal of Membrane Science, 2023, 687: 122029.
- [28] 李振环, 谭策, 苏坤梅. 一种超亲水 PPS 复合纤维膜的制备方法: CN112252022A [P]. 2021-01-22.
- [29] 李颖娜. 紫外辐射条件对紫外光接枝改性聚苯硫醚非织毡亲水性能的研究 [J]. 化工新型材料, 2014, 42(8): 164-166.
- [30] 张娇. 聚苯硫醚非织造布固相磺化及其催化性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [31] ZHANG M L, GAO Y, ZHANG Y X, et al. Preparation and properties of polyphenylene sulfide/oxidized-polyphenylene sulfide composite membranes [J]. Reactive and Functional Polymers, 2021, 160: 104842.
- [32] WANG C, LI Z H, CAO L, et al. A superhydrophilic and anti-biofouling polyphenylene sulfide microporous membrane with quaternary ammonium salts [J]. Macromolecular Research, 2018, 26(9): 800-807.

(下转第 52 页)