

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.06.022

高性能聚苯硫醚长丝的制备工艺

许志强¹, 陈江炳¹, 詹莹韬¹, 徐煜东², 占海华^{2,3,4,5,6,7}, 黄芽¹, 高占岭¹, 滕晓波¹, 任春颖⁸, 赵德方^{3,4,5,6,7,9,10}

(1. 凯泰特种纤维科技有限公司, 浙江绍兴 312000; 2. 浙江省现代纺织技术创新中心, 浙江绍兴 312000; 3. 绍兴文理学院纺织服装学院, 浙江绍兴 312000; 4. 国家碳纤维工程技术研究中心浙江分中心, 浙江绍兴 312000; 5. 纤维基复合材料国家工程研究中心绍兴分中心, 浙江绍兴 312000; 6. 绍兴市高性能纤维及制品重点实验室, 浙江绍兴 312000; 7. 浙江省清洁染整重点实验室, 浙江绍兴 312000; 8. 绍兴市科技创新创业服务中心, 浙江绍兴 312000; 9. 浙江大学材料科学与工程学院, 杭州 310058; 10. 海亮集团有限公司, 杭州 310000)

摘要: 采用熔融纺丝方法通过纺丝组件的设计制备了高性能聚苯硫醚(PPS)长丝, 确定了原料干燥、熔融、喷丝及缓冷区温度和吹风等条件的工艺参数, 探讨了纺丝温度、纺丝速度、牵伸温度、定型温度、牵伸倍数等纺丝工艺参数对 PPS 纤维可纺性和力学性能的影响, 确定了最佳纺丝加工工艺参数。结果表明, 喷丝时初始压力控制在 12 MPa 以上, PPS 螺杆挤出机各区温度分别为 310, 320, 320, 325, 330 °C, 纺丝温度为 300~315 °C, 缓冷区温度为 295~310 °C, 纺丝速度为 2 650 m/min, 总牵伸倍数为 4.9 倍, 第一热辊、第二热辊和第三热辊温度分别为 95, 110 °C 和 140 °C, 制得规格为 299 dtex/48 f PPS 纤维具有良好的可纺性和优异的力学性能, 拉伸断裂强度和断裂伸长率分别可达 4.04 cN/dtex 和 16.4%。

关键词: 聚苯硫醚纤维; 熔融纺丝; 加工工艺条件; 可纺性; 力学性能

中图分类号: TQ340.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)06-0149-06

Preparation process of high-performance polyphenylene sulfide filament

XU Zhiqiang¹, CHEN Jiangbing¹, ZHAN Yingtao¹, XU Yudong², ZHAN Haihua^{2,3,4,5,6,7}, HUANG Ya¹, GAO Zhanling¹,

TENG Xiaobo¹, REN Chunying⁸, ZHAO Defang^{3,4,5,6,7,9,10}

(1. CTA High-tech Fiber Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 2. Zhejiang Provincial Innovation Center of Advanced Textile Technology, Shaoxing 312000, China; 3. College of Textile and Garment, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 4. Zhejiang Sub-center of National Carbon Fiber Engineering Technology Research Center, Shaoxing 312000, China; 5. Shaoxing Sub-center of National Engineering Research Center for Fiber-based Composites, Shaoxing 312000, China; 6. Shaoxing Key Laboratory of High Performance Fibers & Products, Shaoxing 312000, China; 7. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China; 8. Shaoxing Science and Technology Innovation and Entrepreneurship Service Center, Shaoxing 312000, China; 9. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 10. Hailiang Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract : High performance polyphenylene sulfide (PPS) filaments were prepared by melt spinning through the design of spinning assembly. The process parameters of drying, melting, spinning and slow cooling zone temperature and blowing etc. were determined. The effects of spinning parameters including spinning temperature, spinning speed, drawing temperature, setting temperature and drawing ratio on the spinnability and mechanical properties of PPS fibers were discussed and the optimum spinning parameters were determined. The results show that the initial pressure of spinning is controlled above 12 MPa, the temperature of each zone of the PPS screw extruder is 310, 320, 320, 325, 330 °C, the spinning temperature is 300-315 °C, the slow cooling zone temperature is 295-310 °C, the spinning speed is 2650 m/min, the total drawing ratio is 4.9 times, and the temperature of the first hot roller, the second hot roller, and the third hot roller are 95, 110 °C and 140 °C, respectively. The prepared PPS fiber with a specification of 299 dtex/48 f has good spinnability and excellent mechanical properties. The tensile breaking strength and elongation at break can reach 4.04 cN/dtex and 16.4%, respectively.

Keywords : polyphenylene sulfide fiber ; melt spinning ; processing condition ; spinnability ; mechanical property

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C01166), 绍兴市“揭榜挂帅”制科技项目(2021B41003), 浙江省现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室)科研专项基金(CXZX2023003HD)

通信作者: 赵德方, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为功能纤维与高性能纤维及其复合材料

收稿日期: 2024-04-05

引用格式: 许志强, 陈江炳, 詹莹韬, 等. 高性能聚苯硫醚长丝的制备工艺[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 149-154.

XU Zhiqiang, CHEN Jiangbing, ZHAN Yingtao, et al. Preparation process of high-performance polyphenylene sulfide filament[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 149-154.

聚苯硫醚(PPS)是一种半结晶型高性能热塑性树脂,常温下不溶于任何溶剂。PPS具有高刚性、低吸水、强耐酸、耐高温、耐辐射、耐溶剂、优异的尺寸稳定性、自阻燃性、耐磨性、良好的力学性能等^[1-6],其纤维在工业上有广泛的应用,可用于环保过滤材料和绝缘防护材料等^[7]。此外,PPS与玻璃纤维、碳纤维、碳纳米管等增强材料具有良好的相容性,可作为高分子基体或增强纤维用于航空航天和武器工业^[8]。然而,PPS的高熔点、易氧化的特性易造成在纺丝过程中出现纤维结构不稳定、不匀率高等问题,限制了其快速发展与应用。

国内外有大量研究人员对PPS纤维纺丝过程中常出现的纤维结构不稳定、不匀率高的问题进行了探究。刘先正等^[9]制备了线密度为2.0~2.4 dtex、断裂强度不低于4.2 cN/dtex的PPS短纤维,探究了最优纺丝工艺参数,如切片干燥条件、纺丝速度、冷却条件、热定型温度、拉伸倍数等。李文俊等^[10]通过Ti/SiO₂复合纳米改性制备了PPS短纤维,发现Ti/SiO₂在PPS中分散良好,纤维的韧性、结晶度、热稳定性和耐高温氧化性均得到了提高。吴鹏飞等^[11]探究了喷丝板孔径对细旦PPS纤维力学性能、结晶性能与取向性能的影响。研究发现,当喷丝板的最佳孔径为0.2 mm、长径比为3时,纺制的细旦PPS纤维的拉伸断裂强度、结晶度和声速取向因子分别达到了4.7 cN/dtex,62.9%和0.69。李文刚等^[12]通过高速纺丝工艺制备了PPS全拉伸丝(FDY),探究了拉伸温度、纺丝速度、牵伸倍数等纺丝工艺参数对FDY拉伸性能的影响。在90~110 °C时,提高拉伸温度会使FDY的拉伸断裂强度降低,而增大拉伸倍数或纺丝速度会使拉伸断裂强度增大,在最佳工艺条件下,制得的FDY的拉伸断裂强度可达2.249 cN/dtex。Takeshi等^[13]发现热处理条件对PPS纤维结构与性能产生显著的影响,纤维的结晶度与抗张强度在一定温度范围内随着热定型温度的提高而增加。Tomotaka等^[14]探究了多级拉伸条件对PPS纤维结构的影响,发现在一定的牵伸倍数范围内,纤维的结晶度随着牵伸倍数增大而提高。

目前,国内PPS纤维产业化仅限于短纤维,长丝基本停留在实验室研究阶段或中小试生产阶段,并存在生产效率低、性能不稳定等问题。为此,笔者通过纺丝组件的设计,制备出性能稳定、优异的PPS长丝,探讨了原料干燥条件、熔融条件、喷丝条件、

冷却条件、纺丝工艺条件对PPS纤维可纺性及力学性能的影响,为高性能国产PPS长丝的产业化生产提供借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PPS切片:密度为1.35 g/cm³,熔融温度为278 °C,拉伸强度为85 MPa,弯曲强度为140 MPa,德国BASF公司。

1.2 主要仪器及设备

双锥回转真空干燥机:SZG-1000,常州凯航干燥设备有限公司;

双螺杆挤出机:SHJ-20,南京翰易机械电子有限公司;

纺牵联合机:BKV546一部位,北京中丽制机工程技术有限公司;

万能材料试验机:YG021A-III,温州方圆仪器有限公司。

1.3 PPS纤维的制备

将PPS切片送入双锥回转真空干燥机进行干燥处理降低其含水率,将干燥后的切片输送至双螺杆挤出机中,通过预热、熔融、均匀、塑化作用将切片由固体转化为熔体,以一定的温度和压力从螺杆挤出机中挤出,熔体流经纺丝管道分配给纺丝箱的计量泵和喷丝组件后由喷丝板喷出形成熔体细流,熔体细流在缓冷器和侧吹风装置的冷却作用下迅速冷却经纺丝甬道形成预取向丝(POY),丝条再经上油、进行预拉伸、一级热拉伸、二级热拉伸、热定型等工序,最后卷绕到筒子上制得299 dtex/48 f FDY。

1.4 拉伸性能测试

按照GB/T 14344-2008,设定预加张力值、标距和拉伸测试速度分别为2.75 cN,200 mm和1 000 mm/min,每种规格的纤维进行20次测试。

2 结果与讨论

2.1 原料干燥条件

干燥温度和干燥时间的选择对达到干燥效果至关重要。干燥温度较低或干燥时间不足会使干燥效果降低,切片中水分不容易被充分去除,容易引起气泡丝出现,造成纺丝过程不连续,断头率增加。干燥温度过高或干燥时间过长则会造成大分子降解,切片氧化、黏结,从而影响可纺性和纤维质量^[9]。本实验对转鼓真空系统进行了改造,更换了

三级真空泵,含一级水循环真空泵、两级罗茨真空泵,设备极限真空度 ≤ 150 Pa。采用改造的真空转鼓干燥机对PPS切片进行干燥处理,可避免PPS被氧化。经多次试验,PPS切片的干燥温度、干燥时间和真空度分别控制在 $140\sim 166$ $^{\circ}\text{C}$ 、 $8\sim 12$ h和小于 0.1 MPa,使得切片的含水率降至 0.0034% 左右,达到纺丝的要求。

2.2 熔融条件

在螺杆中,PPS形成的固体床不能彻底熔融。相反,已融化的物料由于接触到料筒壁,在料筒壁和熔膜中可通过剪切作用获得热量,从而使温度继续升高。若物料熔融不彻底,则会造成温度、塑化极不均匀。在实践中,具体表现为螺杆压力周期性波动,严重时会因为物料不能充分熔融,而出现环结阻料现象,导致纺丝不能继续进行。为解决这一问题,对PPS所用的螺杆结构进行了调整,采用了分离型螺杆。采取这种结构的螺杆,可尽早分离出已熔物料和未熔物料,也可更快地使未熔物料熔融,同时,已熔物料也不再承受剪切作用,提高了塑化质量,避免了环结阻料现象发生,保证了纺丝稳定连续进行。在采取这一措施的基础上,在螺杆的头部增加了销钉头(图1所示),并通过销钉将熔料多次分割、分流而增加对物料的混炼、均化作用,从而进一步提高了物料的统一性。

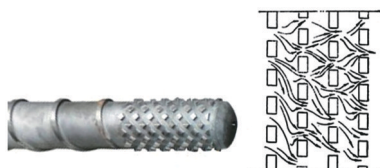


图1 销钉螺杆和销钉的分流作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pin screw and shunt action of pin

螺杆温度是决定高聚物充分熔融和保证熔体适宜黏度的主要条件之一,太低的温度会造成高聚物熔融不充分,熔体特性黏度大;太高的温度则会造成熔体特性黏度下降明显,高聚物发生降解^[11]。经反复试验,PPS切片的螺杆挤出机各区温度分布由低到高时,能满足纺丝的要求,具体为 $310, 320, 320, 325, 330$ $^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 喷丝条件

喷丝组件结构的合理性及喷丝板的优劣是影响纤维可纺性和最终成品丝质量的重要因素。笔者设计了实现熔体分配、适合于PPS纺丝的组件结构(图2所示)。喷丝板选用规格为48 f单组分组件,

纤维成型和可纺性良好。现有化纤喷丝板所用的材质几乎都是SUS316,而本实验的组件则采用SUS630不锈钢材料,该材料在高温高压下具有良好的红硬性,同时经过稳定化处理其变形量非常小。对于加工完毕的喷丝板,其硬度至少要达到洛氏硬度HRC38,这样才能较长时间保持喷丝板面及喷丝孔在使用中不发生变形或破损。组件内部对于采用面密封的部件,如分配板、喷丝板等,在加工精度上提出了较高的要求,其平面度要在 0.01 mm以内,平等度要在 0.02 mm以内,从而保证在熔体压力为 30 MPa时,组件不漏料。熔体流道尺寸精度控制在 0.06 mm以内,粗糙度在6级以上,从而保证熔体能够顺畅流通并均匀分配。根据PPS熔体黏度大、弹性大的特点,对喷丝孔的直径和长径比也做了特殊设计,直径不能低于 0.5 mm,长径比大于4。考虑PPS的熔体特性和纤维可纺性,选用不同粗细多层不锈钢丝网进行了组件压力的试验,最终选定 1.7 mm金属砂作为过滤介质,使组件初始压力在 12 MPa以上,保证纤维出丝稳定。

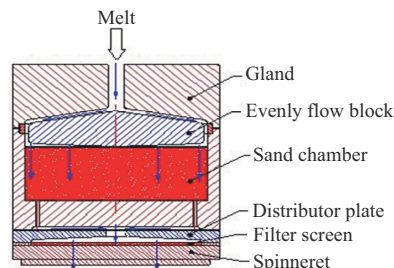


图2 PPS纺丝的组件结构

Fig. 2 Component structure of PPS spinning

2.4 冷却条件

2.4.1 缓冷条件

纤维结构均匀性也会受到冷却条件的影响。PPS黏流温度高,分子链缠结严重,刚性大,因此凝固点接近喷丝板,不能发展出足够的喷丝头拉伸倍数,致使纺丝速度过低,无法卷绕。基于此,通过在喷丝板下方添加缓冷装置来控制丝束的冷却速度,使其发展出较大的喷丝头拉伸倍数,从而提高纺丝速度。丝条在缓冷装置作用下可避免发生过急冷却,在丝条内部产生较多的细小晶核,同时,在后续的熔体细流急冷区域的作用下可提高丝条的取向度和改善取向均匀性。此外,在适宜温度的缓冷区内,喷丝板的板面对丝条起到保温匀温作用,降低甚至消除丝条内外层的温差。如果温度太低,容易使丝条内外结构层产生差异形成皮芯层结构,导致

其结晶度降低;温度太高,则会使丝条与外界的温度差减小,造成大分子的取向和结晶不充分,从而纤维的各项性能指标不能满足后道加工的要求。经反复试验,本试验缓冷区的温度控制在295~310℃。

2.4.2 吹风条件

侧吹风风速大小是影响纤维固化的重要因素。侧吹风速度过大或过小、风湿和风湿太高或太低都会造成大分子取向不充分、条干不匀率增大的现象出现,影响纤维最终的物理和力学性能,本试验侧吹风风速控制在0.3~1.0 m/s,风湿控制在70%~80%,风湿控制在25~28℃。

2.5 纺丝工艺条件

2.5.1 纺丝温度

PPS具有较高的熔点(278℃),纺丝时温度要求较高,缩短熔体在管道中的松弛时间,使得喷丝孔中的弹性效应和喷丝孔出口的膨化效应降低,保证熔体具有良好的流动性能。同时,适当提高纺丝温度可使得熔体均匀性提高,熔体表观黏度降低^[9]。太低的温度易造成切片熔融不均匀,使得熔体黏度过大,导致纺丝困难,纤维不匀率增加和力学性能降低;过高的温度、过低的黏度或熔体不均匀,则会造成纺丝过程中产生的飘丝、毛丝等异常现象增多,丝条出现毛细断裂,断头增加,影响纤维的最终质量,无法进行连续稳定生产。经多次试验,PPS纺丝箱体温度控制在300~315℃为宜。

2.5.2 纺丝速度

纺丝速度是决定纤维的结构和性能的重要因素。纺丝速度太低会造成纤维预取向度较低,易产生细颈现象;纺丝速度太高则会使预取向度增加,可提高纤维成品产量,但同时带来的是断头及毛丝的增加。纺丝速度对纤维可纺性和力学性能的影响见表1。由表1看出,当纺丝速度小于2 650 m/min时,纺丝速度的增加,会使纤维的力学性能提升。因此,在保证力学性能的前提下应尽可能提高

表1 纺丝速度对PPS纤维可纺性和力学性能的影响

| Spinning speed/ (m·min ⁻¹) | Spinnability | Tensile breaking strength/(cN·dtex ⁻¹) | Elongation at break/% |
|---|------------------------------|---|--------------------------|
| 2 250 | Good | 3.85 | 17.7 |
| 2 450 | Good | 3.91 | 17.1 |
| 2 650 | Better | 4.04 | 16.4 |
| 2 850 | Better | 3.75 | 15.5 |
| 3 050 | Easy to cause broken ends | 3.67 | 14.7 |

纺丝速度,从而最大限度地提高生产效率和成品纤维质量。而纺丝速度大于2 650 m/min时,力学性能下降,纺丝速度达到3 050 m/min时,可纺性变差,因此选择纺丝速度为2 650 m/min,此时纤维的可纺性和成品质量良好。

2.5.3 牵伸温度

牵伸温度是保证纤维在牵伸过程中获得优异结构和性能的重要因素。当牵伸温度过低时,拉伸时所需热量不足,出现纤维内部空洞等现象,会使拉伸不均且出现未拉伸丝,需要加大拉伸应力,但这会导致断头现象增加;而牵伸温度过高时,大分子链在牵伸时容易过度伸展,导致毛丝和断头现象增多,甚至使丝条发生融化,拉伸不匀性增大。控制其他因素不变,第一热辊温度对纤维可纺性和力学性能的影响见表2。由表2可知,第一热辊温度控制在85~105℃时,纤维可纺性均良好,综合考虑纤维的力学性能和可纺性,最终选择95℃作为最佳第一热辊温度。

表2 第一热辊温度对PPS纤维可纺性和力学性能的影响

Tab. 2 Effects of the first hot roller temperature on spinnability and mechanical properties of PPS fibers

| The first hot roller temper- ature/°C | Spinnability | Tensile breaking strength/ (cN·dtex ⁻¹) | Elonga- tion at break/% |
|---|--|--|-------------------------------|
| 85 | Normal spinning, good | 3.85 | 15.9 |
| 95 | Normal spinning, good | 4.04 | 16.4 |
| 105 | Good spinnability and no broken ends | 3.88 | 15.3 |
| 115 | Easily sucked by yarn suction gun, and it is easy to break | 3.72 | 14.7 |
| 125 | Poor spinnability | - | - |

控制其他因素不变,第三热辊温度对纤维可纺性及纤维的力学性能的影响见表3。由表3可知,第三热辊温度控制在130~140℃时,纤维可纺性均良好,综合考虑纤维的力学性能指标,最终选择140℃作为最佳第三热辊温度。

2.5.4 定型温度

第二热辊可进一步固定牵伸时形成的分子链结构,对纤维成型起到定型作用,促进纤维的结晶和取向,改善纤维的可纺性。但定型温度不宜过高,否则会造成纤维大分子发生松弛,从而产生解取向现象^[15]。控制其他因素不变,第二热辊温度对纤维可纺性和力学性能的影响见表4。由表4可知,纤维的力学性能受定型温度的影响不大,但定型温

表3 第三热辊温度对PPS纤维可纺性和力学性能的影响

Tab. 3 Effects of the third hot roller temperature on spinnability and mechanical properties of PPS fibers

| The third hot roller temperature/°C | Spinnability | Tensile breaking strength/(cN·dtex ⁻¹) | Elongation at break/% |
|-------------------------------------|--|--|-----------------------|
| 130 | Normal spinning, good | 3.89 | 15.7 |
| 140 | Normal spinning, good | 4.04 | 16.4 |
| 150 | Good spinnability and no broken ends | 3.91 | 15.8 |
| 160 | Easily sucked by yarn suction gun, and it is easy to break | 3.83 | 14.6 |
| 180 | Poor spinnability | - | - |

度的继续升高,会造成可纺性下降,纤维易致绕辊造成断头现象增多。因此,最终选择110℃作为最佳第二热辊温度。

表4 第二热辊温度对PPS纤维可纺性和力学性能的影响

Tab. 4 Effects of the second hot roller temperature on spinnability and mechanical properties of PPS fibers

| The second hot roller temperature/°C | Spinnability | Tensile breaking strength/(cN·dtex ⁻¹) | Elongation at break/% |
|--------------------------------------|--|--|-----------------------|
| 100 | Good | 3.99 | 15.8 |
| 110 | Normal spinning, good | 4.04 | 16.4 |
| 120 | Good, no broken ends | 3.98 | 16.5 |
| 130 | Easily sucked by yarn suction gun, and it is easy to break | 3.97 | 16.1 |
| 140 | Can't be sucked by yarn suction gun, can't spin | 3.97 | 15.9 |

2.5.5 牵伸倍数

成品纤维的拉伸断裂强度和断裂伸长率也会受到牵伸倍数的影响。较高的牵伸倍数,可提高丝条断裂强度,降低其断裂伸长率。但牵伸倍数过高,会使丝条发生断裂,毛丝和断头现象增多。反之,牵伸倍数过低,则会引起拉伸不匀,造成“橡皮筋”丝条现象出现。控制其他因素不变,牵伸倍数对纤维可纺性和力学性能的影响见表5。由表5可知,当牵伸倍数小于4.9时,牵伸倍数增加会造成纤维的可纺性提高,拉伸断裂强度和断裂伸长率分别呈现增加和下降趋势。牵伸倍数的增加,会使得非晶区卷曲的大分子链在牵伸过程中沿着受力方向进一步伸展而整齐排列^[6],非晶区的取向度增加,纤维的承力能力增强。当牵伸倍数太大时,大分子链易被拉断,毛丝和断头现象增多,可纺性下降。因此,最终选择的最优牵伸倍数为4.9。

表5 牵伸倍数对纤维可纺性和力学性能的影响

Tab. 5 Effects of drawing ratio on spinnability and mechanical properties of fibers

| Drawing ratio | Spinnability | Breaking strength/(cN·dtex ⁻¹) | Elongation at break/% |
|---------------|---------------------------|--|-----------------------|
| 4.5 | Good | 3.81 | 17.1 |
| 4.7 | Better | 3.90 | 16.8 |
| 4.9 | Better, no broken ends | 4.04 | 16.4 |
| 5.1 | Better | 3.88 | 15.9 |
| 5.3 | Easy to cause broken ends | 4.11 | 15.5 |

3 结论

(1)根据PPS切片的特性及实际可纺性,选用规格为48 f单组分喷丝板、1.7 mm金属过滤砂。

(2)考虑纤维的可纺性进行反复试验,双螺杆挤出机各区温度设定为310,320,320,325,330℃,纺丝温度设定为300~315℃,缓冷区温度设定为295~310℃。

(3)综合分析纤维可纺性和拉伸性能,选择牵伸倍数为4.9倍,纺丝速度为2 650 m/min,第一热辊、第二热辊和第三热辊温度分别为95,110,140℃,制得力学性能优异的PPS纤维,拉伸断裂强度可达4.04 cN/dtex、断裂伸长率为16.4%。

参考文献

- [1] LV C J, WANG H Y, LIU Z J, et al. A fluorine-free superhydrophobic PPS composite coating with high thermal stability, wear resistance, corrosion resistance[J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 110:47-54.
- [2] RAHATE A S, NEMADE K R, WAGHULEY S A. Polyphenylene sulfide (PPS): State of the art and applications[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2013, 29(6):471-489.
- [3] YU Y, XIONG S, HUANG H, et al. Fabrication and application of poly (phenylene sulfide) ultrafine fiber[J]. Reactive and Functional Polymers, 2020, 150. DOI:10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104539.
- [4] XU Y, LI Z, SU K, et al. Mussel-inspired modification of PPS membrane to separate and remove the dyes from the wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 341:371-382.
- [5] REN H H, XU D X, YAN G M, et al. Effect of carboxylic polyphenylene sulfide on the micromechanical properties of polyphenylene sulfide/carbon fiber composites[J]. Composites Science and Technology, 2017, 146:65-72.
- [6] XING J, NI Q Q, DENG B, et al. Morphology and properties of polyphenylene sulfide (PPS)/polyvinylidene fluoride (PVDF) polymer alloys by melt blending[J]. Composites Science and Technology, 2016, 134:184-190.
- [7] WANG H C, JIANG D H, LIU Y. Life problem analysis on PPS filter application of bag dedusters in coal-fired power plants[J].

- Advanced Materials Research, 2011, 236:2 464-2 470.
- [8] TANG L, ZHANG J L, TANG Y S, et al. Polymer matrix wave-transparent composites: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 75:225-251.
- [9] 刘先正, 李艳玲, 刘秀清, 等. 2.22 dtex 聚苯硫醚短纤维纺丝工艺的探讨[J]. 合成纤维工业, 2013, 36(1):64-66.
- LIU Xianzheng, LI Yanling, Liu Xiuqing, et al. Spinning process of 2.22 dtex polyphenylene sulfide staple fiber[J]. China synthetic fiber industry, 2013, 36(1):64-66.
- [10] 李文俊, 张蕊萍. Ti/SiO₂ 纳米复合改性聚苯硫醚短纤维的研究[J]. 纺织科技进展, 2017(10):13-16.
- LI Wenjun, Zhang Ruiping. Study on Ti/SiO₂ nanocomposite modified polyphenylene sulfide staple fiber[J]. Progress in textile science & technology, 2017(10):13-16.
- [11] 吴鹏飞, 彭梓航, 任捷, 等. 细旦聚苯硫醚纤维的制备及性能[J]. 合成纤维工业, 2022, 45(1):43-47.
- WU Pengfei, PENG Zihang, REN Jie, et al. Preparation and properties of fine denier polyphenylene sulfide fiber[J]. China synthetic fiber industry, 2022, 45(1):43-47.
- [12] 李文刚, 黄标, 袁雯, 等. 聚苯硫醚 FDY 生产工艺探讨[J]. 合成纤维工业, 2012, 35(3):55-57.
- LI Wengang, HUANG Biao, YUAN Wen, et al. Study on production technology of polyphenylene sulfide FDY[J]. China synthetic fiber industry, 2012, 35(3):55-57.
- [13] TAKESHI S, KATSUO N, SHIGEYOSHI K. Staple fiber of polyphenylene sulfide: JP 2003221731[P]. 2003-08-08.
- [14] TOMOTAKA K, ISOO S. Method for producing polyphenylene sulfide fiber: JP 2001262436[P]. 2001-09-26.
- [15] 任天翔, 孙潇潇, 滕晓波, 等. 低强度 LVPET/COPET 皮芯复合长丝的制备及性能研究[J]. 丝绸, 2023, 60(4):38-43.
- REN Tianxiang, SUN Xiaoxiao, TENG Xiaobo, et al. Study on the preparation and properties of low-strength LVPET/COPET skin-core composite filaments[J]. Silk, 2023, 60(4):38-43.
- [16] 邓安国, 高占岭, 郭薇薇, 等. 聚丙烯超细 FDY 长丝的制备及性能研究[J]. 合成纤维工业, 2021, 44(6):25-29.
- DENG Anguo, GAO Zhanling, GUO Weiwei, et al. Study on the preparation and properties of ultrafine polypropylene FDY[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2021, 44(6):25-29.

(上接第 128 页)

- [21] 曹岩, 徐海龙, 郝建秀, 等. 混合木粉质量比对木塑复合材料性能的影响[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(3):284-289.
- CAO Yan, XU Hailong, HAO Jianxiu, et al. Influence of ratio of hybrid wood flour on physical and mechanical properties of wood-plastic composites[J]. Journal of Forestry and Environment, 2018, 38(3):284-289.
- [22] 李东方. 聚乙烯木塑复合材料性能影响因子与界面特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- LI Dongfang. Study on performance influence factors and interfacial characteristic of PE wood plastic composite[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [23] DE PRÁ ANDRADE M, POLETTO M. Wood treatments and interfacial bonding in wood-plastic composites[M]//Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications. Singapore: Springer, 2021:43-65.
- [24] JIAN B Y, MOHRMANN S, LI H T, et al. A review on flexural properties of wood-plastic composites[J]. Polymers, 2022, 14(19). DOI:10.3390/polym14193942.
- [25] ZHENG H, ZHANG W, LI B, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 233. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109639.