

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.06.024

# 异形截面复合导电涤纶纤维的制备及性能

张炯<sup>1</sup>, 许志强<sup>2</sup>, 陈江炳<sup>2</sup>, 詹莹韬<sup>2</sup>, 黄芽<sup>2</sup>, 高占岭<sup>2</sup>, 徐煜东<sup>3</sup>, 马金星<sup>4</sup>, 占海华<sup>1,3,5,6,7,8</sup>, 赵德方<sup>1,5,6,7,8,9,10</sup>

(1. 绍兴文理学院纺织服装学院, 浙江绍兴 312000; 2. 凯泰特种纤维科技有限公司, 浙江绍兴 312000; 3. 浙江省现代纺织技术创新中心, 浙江绍兴 312000; 4. 绍兴水乡纺织科技有限公司, 浙江绍兴 312000; 5. 浙江省清洁染整重点实验室, 浙江绍兴 312000; 6. 国家碳纤维工程技术研究中心浙江分中心, 浙江绍兴 312000; 7. 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; 8. 绍兴市高性能纤维及制品重点实验室, 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:** 设计并制备了规格为 22 dtex/3 f 的 4 种不同截面(一字型、两点型、三点型、皮芯型)导电涤纶纤维, 并对纤维截面形状、成品颜色、取向度、拉伸性能、导电性能、热稳定性等进行了测试与比较。结果表明, 无论选用何种截面, 加入碳纳米管/炭黑导电母粒后纤维均具有优异的导电性能(单位电阻处于  $10^7 \Omega/\text{cm}$ ); 相较于皮芯型导电纤维, 选用异形截面(一字型、两点型、三点型)在一定程度上降低了纤维内部的均匀性, 增加了纤维在制备过程中的取向难度, 导致制备得到的纤维取向度以及拉伸断裂强度略有降低, 但 4 种纤维的热稳定性差异不大; 异形截面导电纤维能够得到与皮芯型导电纤维相近的导电性能, 但由于异形截面导电纤维中裸露在外的碳纳米管/炭黑导电组分减少, 其纤维成品颜色明显浅于皮芯型导电纤维, 扩大了该类导电纤维的应用范围。

**关键词:** 异形截面; 导电涤纶纤维; 导电性能; 拉伸性能; 热稳定性

**中图分类号:** TQ342+.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)06-0164-06

## Preparation and properties of composite conductive polyester fibers with irregular cross sections

ZHANG Jiong<sup>1</sup>, XU Zhiqiang<sup>2</sup>, CHEN Jiangbing<sup>2</sup>, ZHAN Yingtao<sup>2</sup>, HUANG Ya<sup>2</sup>, GAO Zhanling<sup>2</sup>, XU Yudong<sup>3</sup>, MA Jinxing<sup>4</sup>, ZHAN Haihua<sup>1,3,5,6,7,8</sup>, ZHAO Defang<sup>1,5,6,7,8,9,10</sup>

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

**Abstract:** Four kinds of conductive polyester fibers with specifications of 22 dtex/3 f were designed and prepared using different cross sections (one-line, two-point, three-point and sheath-core), and the cross section shape, finished product color, orientation degree, tensile properties, electrical conductivity, and thermal stability of the fibers were tested and compared. The results show that regardless of whether the cross section was selected, the fibers with added conductive carbon nanotube/carbon black conductive masterbatch exhibit excellent conductivity (unit resistance is in the magnitude of  $10^7 \Omega/\text{cm}$ ). Compared to sheath-core shaped conductive fibers, the use of irregular cross sections (one-line, one-point, and three-point) reduces the uniformity inside the fibers to some extent, increases the difficulty of fiber orientation during the preparation process, leading to the slight decrease of fiber orientation and tensile breaking strength, but the thermal stability of the four kinds of fibers has little difference. Irregular cross section conductive fibers can achieve conductivity similar to sheath-core shaped conductive fiber, but due to the reduction of exposed carbon nanotube/carbon black conductive components in fibers with irregular cross sections, the color of the fiber products is significantly lighter than that of the sheath-core shaped fiber product, expanding the application range of these types of conductive fibers.

**Keywords:** irregular cross section; conductive polyester fiber; conductivity; tensile property; thermal stability

**基金项目:** 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C01166), 中国纺织工业联合会科技指导性项目(2021169), 国家级大学生创新创业训练计划项目(202210349023)

**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:** 2024-04-14

**引用格式:** 张炯, 许志强, 陈江炳, 等. 异形截面复合导电涤纶纤维的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 164-169.

ZHANG Jiong, XU Zhiqiang, CHEN Jiangbing, et al. Preparation and properties of composite conductive polyester fibers with irregular cross sections[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 164-169.

我国2022年化学纤维产量达6 000多万t,其中涤纶纤维占比70%以上<sup>[1]</sup>。作为合成纤维的第一大品种,涤纶纤维具有优异的综合性能,如模量高、强度高、弹性高、保形性和耐热性良好等,被广泛应用于各个领域。但涤纶纤维的单位电阻常大于 $10^{13} \Omega/\text{cm}$ ,在生产过程中易积聚静电荷,对纺织产品质量和安全生产造成巨大的威胁。同时,随着科技发展和人类生活品质的不断改善,静电对人类生产生活造成的不利影响日益突出,若只使用常规涤纶纤维,容易产生静电放电导致精密电子设备损坏、易燃物起火爆炸、人体不适感等问题<sup>[2-8]</sup>。

导电纤维是指能降低或消除在使用过程中产生静电的一种功能性纤维,它具有电荷传导和尖端放电的能力,在航空航天、汽车、电子、机械、化工、通信、建筑、医疗、轻纺等领域应用广泛,对国防军工和国民经济具有重大意义<sup>[9]</sup>。尤其是近些年智能穿戴的兴起和特殊领域设备的发展,对于导电纤维的性能要求不断提高,需求量也不断增加,使得导电纤维的开发与研究始终是科研工作者的研究热点之一<sup>[10]</sup>。导电纤维主要包括均一组分型、涂覆型、填料/聚合物复合型3种。均一组分型导电纤维包括金属纤维、本征导电聚合物纤维和碳纤维等,纤维普遍偏硬,服用性差;涂覆型导电纤维耐久性差;而填料/聚合物复合型导电纤维由于防静电效果出色,力学性能、耐久性、服用性好,应用最为广泛<sup>[11]</sup>。

在填料/聚合物复合型导电纤维中,涤纶导电纤维的开发相对较容易且耐久性优异,是目前常用的导电纤维品种。市场上的导电涤纶产品常用炭黑作为导电填料来提高纤维的导电性,但制备的纤维往往偏黑,且无法进行染色,严重制约了其应用范围。虽然近几年已有多品种浅色或白色导电纤维问世,但由于填料导电性的限制,白色导电纤维的导电性不如炭黑系导电纤维,且纺丝性能也存在不稳定的情况,无法满足各领域对纤维性能的要求<sup>[12-14]</sup>。为此,笔者设计了几种特殊截面的喷丝板,以碳纳米管/炭黑导电母粒为原料,通过复合纺丝技术制备得到异形截面(一字型、两点型、三点型)的导电涤纶长丝,并与皮芯型碳纳米管/炭黑导电长丝的性能进行对比。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

聚对苯二甲酸乙二酯(PET)切片:熔点为

260 °C,密度为 $1.22 \text{ g/cm}^3$ ,绍兴柯桥瑞丽化纤有限公司;

碳纳米管/炭黑导电母粒:熔点为230 °C,密度为 $1.22 \text{ g/cm}^3$ ,凯泰特种纤维科技有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

切片干燥机:KF,北京德厚朴化工技术有限公司;

FDY纺牵联合机:BKV546,北京中丽制机工程技术有限公司;

缕纱测长仪:YG086,温州方圆仪器有限公司;

电子单纱强力机:YG021A-III,温州方圆仪器有限公司;

声速纤维取向度测量仪:SCY-III,上海东华凯利化纤高科技技术有限公司;

光学显微镜:MDP-A1,上海测维光电技术有限公司;

数字超高电阻、微电流测量仪:EST121,上海皓信仪器仪表有限公司;

热重/差热综合分析仪:TG/DTA 6300,日本精工仪器有限公司。

### 1.3 不同截面导电涤纶纤维的制备

纺丝前,先通过试验确定PET切片和碳纳米管/炭黑导电母粒的组分配比,并分别对PET切片和碳纳米管/炭黑导电母粒进行充分干燥。将经干燥后的PET切片和碳纳米管/炭黑导电母粒分别送至各自的单螺杆挤压机进行熔融挤压。熔融完成后的PET和碳纳米管/炭黑导电母粒经过滤器过滤后,由两条纺丝管路分别输送到纺丝箱体各自各自的计量泵中,按照PET与母粒质量比80:20,进入复合纺丝组件中进行复合,再从4种不同截面(一字型、两点型、三点型和皮芯型)的喷丝板喷出,经侧吹风甬道冷却凝固成导电涤纶长丝,通过油轮上油后再经热辊牵伸热定型,最后送至卷绕机卷绕成筒,得到了规格为22 dtex/3 f的导电纤维。不同截面导电涤纶纤维主要的制备工艺参数见表1,制备工艺流程如图1所示。

### 1.4 测试与表征

#### 1.4.1 导电性能测试

使用数字超高电阻、微电流测量仪,按照FZ/T 50035-2016测试纤维电阻,取一段10 cm的纤维,在纤维两端贴上导电胶,放入仪器中测得一字型、两点型、三点型和皮芯型导电涤纶纤维的单位

表1 制备导电涤纶纤维的主要工艺参数

Tab. 1 Main process parameters for preparing conductive polyester fibers

Main process parameters	Values or conditions
Drying conditions	PET:Dried by drying tower, drying condition is 130 °C/12 h, dew point of dry air is below -70 °C CNT/CB:Dried by vacuum drum, drying condition is 130 °C/12 h, vacuum degree is 0.02 MPa
Screw temperature/°C	PET:292/290/290/290/290 CNT/CB:268/270/270/270
Box temperature/°C	290±2
Air temperature of quench wind/°C	24±2
Air speed of quench wind/(m·s <sup>-1</sup> )	0.55~0.60
Humidity of quench wind/%	75~80
Drawing ratio	2.5
Spinning speed/(m·min <sup>-1</sup> )	3 000
Drafting and setting temperature/°C	Drafting temperature:90; Setting temperature:135

Note: CNT/CB is carbon nanotube/carbon black conductive masterbatch.

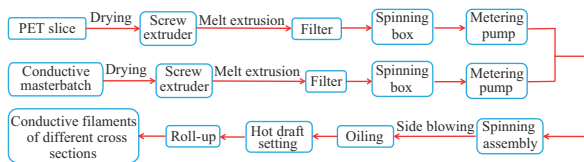


图1 不同截面的导电涤纶长丝制备工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation process of conductive polyester filaments with different cross sections

电阻。

#### 1.4.2 线密度测试

依据 GB/T 14343-2008,采用测长称重法(绞纱法测试长度)对纤维的线密度进行测量,每种规格的纤维测量5次,对其进行计算得到平均值。

#### 1.4.3 拉伸性能测试

按照 GB/T 14337-2022,使用电子单纱强力机测试纤维的拉伸性能,设置试样的夹持长度为250 mm,拉伸速度为20 mm/min,每种纤维测试20组取平均值。

#### 1.4.4 取向度测试

采用声速法测量纤维的取向因子,设置声频为2 000 Hz、隔距为20 cm和40 cm、预加张力为0.098 cN/dtex,选取纤维纵向不同位置进行测试,记录纤维取向时所测得的实际声速。

#### 1.4.5 热重测试

选取5 mg左右的待测试样,放置于坩埚中。利用热重/差热综合分析仪对试样进行热重分析测试,测定复合材料质量随温度变化的规律。测试条件:氮气气氛,升温速率10 °C/min,体积流量200 mL/min,实验温度30~700 °C。

#### 1.4.6 纤维横截面光学观察

采用哈氏切片器对得到的纺流丝进行切片制备测试样品,将样品放在光学显微镜下对其横截面

进行观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纤维的截面与成品形貌

对于异形截面的导电纤维,其截面形状会直接影响纤维的导电性能,因此在纺丝工艺调整过程中应及时调整截面的成型情况。图2是调整至最佳纺丝工艺条件后取4种纤维的初生丝观察得到的不同截面,其中深色部分为碳纳米管/炭黑导电成分,其余占大比例的浅色基体部分为常规涤纶。从图2截面来看,皮芯型导电纤维中碳纳米管/炭黑导电成分作为皮层完全包裹涤纶基体,而观察3种异形纤维的截面,其碳纳米管/炭黑导电成分只有少部分裸露在外面,在实际生产过程中,碳纳米管/炭黑的存在会对设备造成一定的磨损,因此异形截面的选用可一定程度上减少在纤维制备以及后道应用中对设备的不利影响,提高设备的使用寿命。

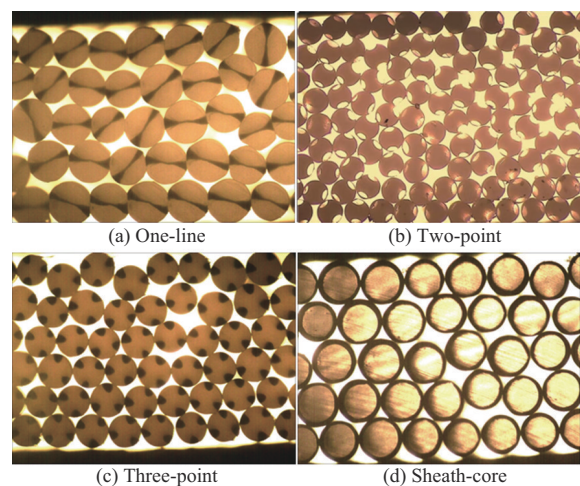


图2 导电纤维的截面

Fig. 2 Cross sections of conductive fibers

4种导电涤纶纤维成品的照片如图3所示。由图3可看出,由于碳纳米管/炭黑的存在,4种纤维成品并不像常规涤纶那样显示白色,尤其是皮芯型导电纤维,其颜色为明显的黑色,这严重影响了该类导电纤维后续的应用范围。而其余3种异形截面导电纤维因其碳纳米管/炭黑导电成分裸露较少而呈浅灰色,在一定程度上弥补了皮芯型导电纤维的缺陷,拓宽了其应用领域。另外,三点型截面的导电纤维颜色要略深于其他两种异形截面的导电纤维,这可能跟三点型截面裸露在外的数量和面积更多有关。

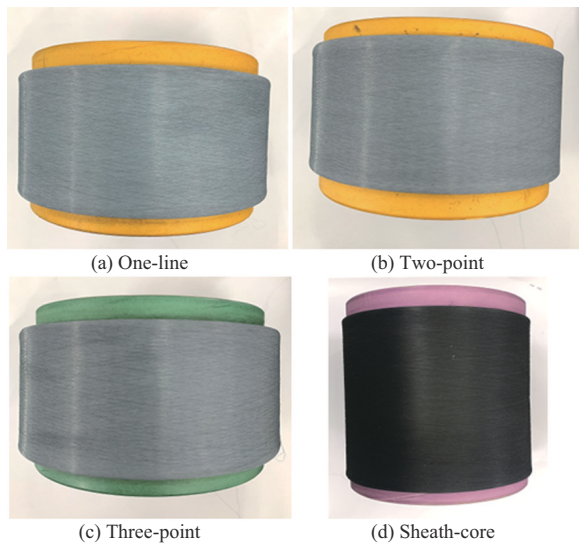


图3 不同截面的导电纤维成品照片

Fig. 3 Photos of conductive fiber products with different cross sections

## 2.2 纤维的性能分析

### 2.2.1 纤维的取向度

纤维的取向因子 $f$ 介于0与1之间,随着取向因子的增大,纤维大分子链排列规整性越好。取向角 $\alpha$ 也可以衡量大分子链的取向程度,其值越大代表越不利于大分子链的取向,即取向度越低<sup>[15]</sup>。

$f$ 和 $\alpha$ 可由式(1)和式(2)进行计算。

$$f = 1 - \left( \frac{C_{\mu}}{C_1} \right)^2 \quad (1)$$

$$\cos^2 \alpha = 1 - \frac{2}{3} \left( \frac{C_{\mu}}{C_1} \right)^2 \quad (2)$$

式中: $C_1$ 为所测得的实际声速,单位km/s; $C_{\mu}$ 为大分子未取向时的涤纶声速,其值为1.35 km/s。

4种不同截面纤维的取向度测试结果见表2。由表2可知,3种异形截面的导电纤维取向因子 $f$ 和取向角 $\alpha$ 接近,表明三者的取向度较为接近。而相

较于皮芯型截面的导电纤维,其他3种异形截面的纤维 $f$ 值偏小, $\alpha$ 值偏大,表明纤维截面异形化设计在一定程度上降低了纤维内部的均匀性,增加了纤维大分子在取向过程中的难度和复杂性,从而导致制备得到的纤维的取向度有所降低。

表2 不同截面的导电纤维取向度

Tab. 2 Orientation degree of conductive fibers with different cross sections

Fibers	Actual sound velocity $C_1/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	Orientation factor $f$	Orientation angle $\alpha$
one-line	6.13	0.951 5	10.36
two-point	6.14	0.951 7	10.34
three-point	6.20	0.952 6	10.24
sheath-core	6.46	0.956 3	9.83

### 2.2.2 纤维的线密度与拉伸性能

4种不同截面导电纤维的线密度与拉伸性能见表3。由表3可以看出,4种导电纤维的线密度相近,均在23 dtex左右。同样的,3种异形截面的导电纤维平均拉伸断裂强度较为接近,而断裂伸长率略有差异。一般情况下,纤维的取向度越高,纤维能够承受外力作用的能力越强<sup>[16]</sup>,相应的拉伸断裂强度越高,断裂伸长率越低。从表3可得到,三种异形截面导电纤维的拉伸强度略低于皮芯型截面导电纤维,断裂伸长率高于皮芯型导电纤维,该结果与取向度结果一致。

表3 不同截面的导电纤维拉伸性能

Tab. 3 Linear density and tensile properties of conductive fibers with different cross sections

Fibers	Linear density/dtex	Average tensile breaking strength/(cN·dtex <sup>-1</sup> )	Average elongation at break/%
one-line	23.7	1.93	46.91
two-point	23.6	1.89	48.36
three-point	23.5	1.95	42.35
sheath-core	23.8	2.18	37.38

### 2.2.3 纤维的导电性能

纤维的导电性能高低是检验制备得到的导电纤维是否满足市场要求最为关键的指标,在生产测试中通常用纤维单位长度的电阻即单位电阻来表示纤维的导电性能。表4显示的是4种不同截面导电纤维的导电性能测试结果。从表4可看出,4种截面的导电纤维的单位电阻的数量级均在 $10^7$ ,远远低于常规涤纶纤维的单位电阻( $10^{13} \Omega/\text{cm}$ ),说明在纤维中加入碳纳米管/炭黑导电母粒后,纤维导电性能得到了显著提高。此外,不管选用的是哪种异形截面,纤维的导电性能均与皮芯型截面的导电纤维接近,这说明异形截面的设计使用,虽然裸露在外部

的碳纳米管/炭黑导电成分有所减少,但对纤维的导电性能影响较小,仍然能够很好地满足市场对纤维导电性能的要求。

表4 不同截面的导电纤维导电性能

Fibers	Unit resistance/ $(\Omega \cdot \text{cm}^{-1})$
one-line	$2.51 \times 10^7$
two-point	$1.17 \times 10^7$
three-point	$3.46 \times 10^7$
sheath-core	$1.83 \times 10^7$

#### 2.2.4 纤维的热稳定性

4种不同截面导电纤维的热重曲线如图4所示,由热重曲线得出的典型的热降解特征温度——失重率达到5%,10%,30%的温度( $T_5, T_{10}, T_{30}$ )结果列于表5。由图4可知,当温度 $\leq 300^\circ\text{C}$ 时,4种导电纤维的质量几乎不下降;当温度升至350~450 $^\circ\text{C}$ ,4种导电纤维的质量发生了显著的下降;当温度 $\geq 600^\circ\text{C}$ 时,4种导电纤维的质量几乎不再变化,质量保持在20%左右。由表5可知,4种不同截面导电纤维的 $T_5$ 之间的差异小于1.6%, $T_{10}$ 之间的差异小于2.6%, $T_{30}$ 之间的差异小于1.6%,差异较小,说明4种不同截面导电纤维的热稳定性差异不大。

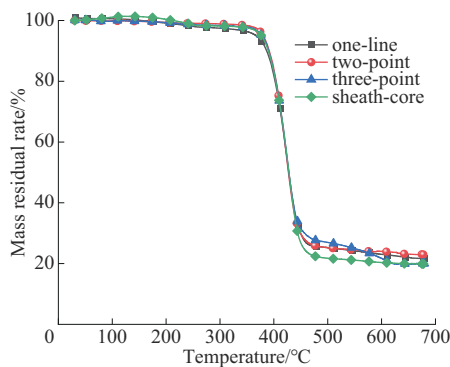


图4 不同截面的导电纤维热重曲线

Fig. 4 Thermogravimetric curves of conductive fibers with different cross sections

表5 不同截面的导电纤维热降解参数

Fibers	$T_5/^\circ\text{C}$	$T_{10}/^\circ\text{C}$	$T_{30}/^\circ\text{C}$	Mass residual rate at 700 $^\circ\text{C}/\%$
one-line	373.98	381.42	408.51	20.68
two-point	379.97	391.42	412.99	22.99
three-point	379.22	392.38	415.02	19.89
sheath-core	376.66	389.69	413.11	19.88

Note:  $T_5, T_{10}, T_{30}$  represents temperature at which weight loss reaches to 5%, 10%, and 30%, respectively.

### 3 结论

(1)不管使用何种截面制备导电涤纶纤维,碳纳米管/炭黑导电母粒的加入均能大幅提高纤维的导电性能。对于3种异形截面(一字型、两点型、三点型)导电纤维,虽然裸露在外的碳纳米管/炭黑导电组分较少,但仍能够得到与皮芯型导电纤维相近的导电性能。3种异形截面制备得到的纤维成品颜色明显浅于皮芯型,扩大了该类导电纤维的应用范围。

(2)异形截面的设计在一定程度上降低了纤维内部的均匀性,增加了纤维在制备过程中的取向难度,导致制备得到的纤维取向度以及拉伸断裂强度均略低于皮芯型截面的导电纤维,但4种纤维的热稳定性差异不大。

#### 参考文献

- [1] 端小平. 2023年中国化纤经济形势分析与预测[M].北京:中国纺织出版社,2023.  
DUAN Xiaoping. Analysis and forecast of China chemical fiber economic situation in 2023[M]. Beijing: China Textile Press, 2023.
- [2] KIM M S, KIM H K, BYUN S W, et al. PET fabric/polypyrrole composite with high electrical conductivity for EMI shielding[J]. Synthetic metals, 2002, 126(2-3):233-239.
- [3] KAYNAK A, BELTRAN R. Effect of synthesis parameters on the electrical conductivity of polypyrrole-coated poly (ethylene terephthalate) fabrics[J]. Polymer international, 2003, 52(6): 1 021 - 1 026.
- [4] RASTEGAR L, MONTAZER M, GAMINIAN H. Multifunctional colored polyester fabric treated with dopamine hydrochloride at room temperature: Higher tensile, hydrophilicity and anti-bacterial properties along with aminolysis[J]. Fibers and Polymers, 2017, 18: 1 915-1 923.
- [5] YIN J, NYSTEN B. Contact electrification and charge decay on polyester fibres: A KPFM study[J]. Journal of Electrostatics, 2018, 96:16-22.
- [6] WANG C, GUO R H, LAN J W, et al. Preparation of multi-functional fabric via silver/reduced graphene oxide coating with poly (diallyldimethylammonium chloride) modification[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29: 8 010 - 8 019.
- [7] KUMAR N, GINTING R T, OVHAL M, et al. All-solid-state flexible supercapacitor based on spray-printed polyester/PEDOT: PSS electrodes[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2018, 660: 135-142.
- [8] SMITH D R, MOCK J J, STARR A F, et al. Gradient index meta-

- materials[J]. *Physical Review E*, 2005, 71:211–230.
- [9] HOU Z, LIU X, TIAN M, et al. Smart fibers and textiles for emerging clothe-based wearable electronics: Materials, fabrications and applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(33): 17 336–17 372.
- [10] 濮平, 吴德雯, 丁明, 等. 导电纤维在“智能+”领域的应用[J]. *天津纺织科技*, 2023(5):43–45.  
PU Ping, WU Dewen, DING Ming, et al. The future of conductive fibers in “Intelligence+”[J]. *Tianjin Textile Science & Technology*, 2023(5):43–45.
- [11] 王维杰, 曹良波, 郭荣辉. 导电纤维的发展现状及应用[J]. *纺织科学与工程学报*, 2024, 41(1):101–110.  
WANG Weijie, CAO Liangbo, GUO Ronghui. Development status and applications of conductive fibers[J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2024, 41(1):101–110.
- [12] 许志强, 李顺希, 吕利川, 等. 白色涤纶导电纤维的纺丝工艺[J]. *合成纤维*, 2016, 25(4):23–26.  
XU Zhiqiang, LI Shunxi, LYU Lichuan, et al. Processing technology of white polyester conductive fiber[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2016, 25(4):23–26.
- [13] 关桂荷, 陈挺, 章悦庭, 等. 白色复合型导电涤纶的研究[J]. *合成纤维工业*, 1993, 16(4):19–23.  
GUAN Guihe, CHEN Ting, ZHANG Yueting, et al. Study on white composite conducting PET fiber[J]. *Synthetic Fiber Industry*, 1993, 16(4):19–23.
- [14] 延亚峰, 宋春雨, 曹敏悦, 等. 复合型导电纤维的制备及性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2016, 32(6):143–147.  
YAN Yafeng, SONG Chunyu, CAO Minyue, et al. Preparation and property of composite conductive fibers[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2016, 32(6):143–147.
- [15] 赵德方, 毛加冲, 黄芽, 等. PP/PA6中空橘瓣型复合超细纤维的制备及性能研究[J]. *丝绸*, 2022, 59(6):44–49.  
ZHAO Defang, MAO Jiachong, HUANG Ya, et al. Study on preparation and properties of PP/PA6 hollow segmented-pie composite superfine fibers[J]. *Silk*, 2022, 59(6):44–49.
- [16] 毛加冲, 任天翔, 许志强, 等. 熔纺PE/PP复合超细FDY丝的制备工艺[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(12):58–63.  
MAO Jiachong, REN Tianxiang, XU Zhiqiang, et al. The preparation process of melt-spun PE/PP composite ultrafine FDY filament [J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 55(12):58–63.

(上接第148页)

- YUAN Xinqiang, JIANG Peng, AI Taotao, et al. MMA polymerization and microfoaming application initiated with in BPO/DMA [J]. *Plastics*, 2018, 47(6):102–106.
- [14] ROMADHONA R, ROCHMADI, ARIYANTO T, et al. Kinetic study of polymerization reaction of bisphenol a diglycidyl ether and terephthalic acid[J]. *Materials Science Forum*, 2022, 1 067: 79–84.
- [15] 李福来, 杨增福, 陈亚芹, 等. 快速拉挤用环氧树脂固化动力学及动态力学性能研究[J]. *中国塑料*, 2023, 37(6):66–73.  
LI Fulai, YANG Zengfu, CHEN Yaqin, et al. Study on curing kinetics and dynamic mechanical properties of epoxy resin for rapid pultrusion[J]. *China Plastics*, 2023, 37(6):66–73.
- [16] ZVETKOV V L, SIMEONOVA-IVANOVA E, CALADO V. Comparative DSC kinetics of the reaction of DGEBA with aromatic diamines IV. Iso-conversional kinetic analysis[J]. *Thermochimica Acta*, 2014, 596:42–48.
- [17] KISSINGER H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 1957, 29(11):1 702–1 706.
- [18] OZAWA T. A new method of analyzing thermogravimetric data[J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan Bull*, 1965, 38(11): 1 881–1 886.