

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.004

聚酯导电纤维母粒的制备及应用

盛平厚¹, 武英才^{1,2}, 丁筠², 李睿¹, 郑晓颀¹, 韩朝阳¹, 王添艺²

(1. 中国纺织科学研究院有限公司生物基纤维材料全国重点实验室, 北京 100025; 2. 北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029)

摘要: 采用熔融共混法制备不同含量导电炭黑(CB)的聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)导电纤维母粒, 系统研究了 CB 含量对 PBT 导电母粒结构与性能的影响规律, 并详细分析了 CB 在 PBT 基体中的分散状态及其对母粒导电性能、流变行为、热稳定性与结晶特性的影响。实验结果显示, CB 在 PBT 基体中分散较为均匀, 且母粒的熔体表观黏度较纯 PBT 显著下降; 随着 CB 含量的增加, 母粒表面电阻明显降低。热分析表明, CB 可发挥异相成核作用, 促使 PBT 的结晶温度上升, 同时有效提升了材料的热稳定性。在此基础上, 通过熔融复合纺丝工艺制备了聚酯抗静电纤维, 系统探讨了导电母粒添加比例、定型温度及牵伸倍率等关键工艺参数对聚酯抗静电纤维性能的影响。结果表明, 导电母粒的加入量对纤维体积电阻和力学性能均具有调控作用, 综合抗静电性能和力学性能的测试结果可知, 在热定型温度为 140 °C, 牵伸倍率为 1.4 时, 复合 20% 导电母粒的聚酯抗静电纤维强度和抗静电性能较好。

关键词: 聚酯; 导电母粒; 复合纺丝; 抗静电; 纤维

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0027-07

Preparation and application of polyester conductive fiber master batch

SHENG Pinghou¹, WU Yingcai^{1,2}, DING Yun², LI Rui¹, ZHENG Xiaodi¹, HAN Zhaoyang¹, WANG Tianyi²

(1. State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, China Textile Academy, Beijing 100025, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : Conductive polybutylene terephthalate (PBT) masterbatches containing different amounts of conductive carbon black (CB) were prepared via melt blending. The effects of CB content on the structure and properties of the conductive masterbatches were systematically investigated. Various test methods were employed to analyze the dispersion state of CB in the PBT matrix and its effects on the electrical conductivity, rheological behavior, thermal stability, and crystallization characteristics of the masterbatches. The results indicate that conductive CB is uniformly dispersed in the PBT matrix, and the melt apparent viscosity of the masterbatch decreases significantly compared to pure PBT. With the increase of CB content, the surface resistance of the masterbatch decreases noticeably. Thermal analysis reveals that CB acts as a heterogeneous nucleating agent, increasing the crystallization temperature of PBT, while also effectively enhancing the thermal stability of the material. Based on these findings, polyester antistatic fibers were prepared through melt composite spinning, and the effects of key process parameters, such as the conductive masterbatch addition ratio, heat-setting temperature and draw ratio on fiber properties were systematically examined. The results demonstrate that the amount of conductive masterbatch added regulates both the volume resistivity and mechanical properties of the fibers. Considering the overall antistatic performance and mechanical properties, the polyester antistatic fiber with 20% conductive masterbatch has better strength and antistatic property when the heat-setting temperature is 140 °C and the draw ratio is 1.4.

Keywords : polyester ; conductive masterbatch ; composite spinning ; antistatic ; fiber

聚酯纤维作为用量最大的合成纤维材料, 具有力学性能、化学稳定性高等特点, 广泛用于服装、家饰以及其他工业领域^[1-3]。然而聚酯分子结

构决定了其分子极性较小, 纤维表面易产生静电, 常规聚酯纤维体积电阻率在 $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上, 抗静电性能较差, 限制了聚酯纤维在智能服装、个体防

通信作者: 丁筠, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为聚合物功能改性材料和色母粒

收稿日期: 2025-10-13

引用格式: 盛平厚, 武英才, 丁筠, 等. 聚酯导电纤维母粒的制备及应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 27-33.

SHENG Pinghou, WU Yingcai, DING Yun, et al. Preparation and application of polyester conductive fiber master batch[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 27-33.

护、军事安全、能源电子等领域更广泛的应用。随着智能纺织品和可穿戴电子设备的快速发展,聚酯导电纤维材料的研究已成为纤维材料科学领域的重要方向之一^[4-8]。熔融复合纺丝法是导电纤维较为常用的生产方法,即采用导电纤维母粒与聚酯或聚酰胺等复配,采用双组分复合纺丝工艺来制备。导电纤维母粒作为导电纤维的功能性核心组分,对导电纤维生产工艺以及导电纤维产品的性能有着重要影响。相关文献报道关于炭黑、碳纳米管等改性聚对苯二甲酸乙二酯(PET)聚酯导电母粒和复合型聚酯导电纤维制备的研究较多,但关于聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)基的聚酯导电母粒的研究较少^[9-12]。由于PET分子链刚性更大,PBT分子链柔性更好,在添加了较高含量导电炭黑的体系中,PBT聚酯导电母粒具有更好的可加工性,更有利于聚酯复合纺丝加工成型,开展PBT导电母粒的相关研究对复合型聚酯导电纤维的制备可提供较有意义的技术参考价值。本研究采用熔融挤出工艺制备了不同导电炭黑(CB)含量的PBT导电母粒,系统探讨了CB含量变化对母粒导电性能、流变性能及热性能等的影响规律,从而为聚酯导电母粒在纤维制备领域的应用提供技术指导。此外,通过熔融复合纺丝工艺制备聚酯抗静电纤维,深入研究了导电母粒复合比例、定型温度及牵伸倍率等工艺参数对纤维抗静电性能与力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBT树脂:GL236A,特性黏度为1.3 dL/g,仪征化纤股份有限公司;

PET树脂:FC510,特性黏度为0.675 dL/g,仪征化纤股份有限公司;

CB:粒径20 nm,市售。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:ZSK-25,科倍隆(南京)机械有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:RL-Z1B₁,上海思尔达科学仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC8000,美国Perkin-Elmer公司;

热重(TG)分析仪:Pyris1,美国Perkin-Elmer公司;

毛细管流变仪:GottfertRheograph25,德国Gottfert公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6360,日本电子株式会社;

真空干燥箱:DZF-6050,中仪国科(北京)科技有限公司;

乌氏黏度计:IVS300,杭州中旺科技有限公司;

数字超高阻微电流仪:ESTI21,北京劳动保护科学研究所;

单丝强力仪:Instron2343,英国Instron公司;

纺丝机:北京中丽制机工程技术有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 PBT导电母粒的制备

实验前,PBT切片先在真空干燥箱中80℃预结晶4 h,之后在135℃真空干燥8 h以上。CB在100℃干燥8 h。通过双螺杆挤出机的失重计量喂料系统按照CB质量分数20%,25%,28%的比例,在255℃条件下通过双螺杆挤出机拉条造粒,得到不同CB含量的PBT导电母粒。

1.3.2 聚酯抗静电纤维的制备

将PBT导电母粒与PET放入真空干燥箱中干燥后加入纺丝机,将CB质量分数28%的PBT导电母粒,按15%,20%,25%及30%的复合比例与PET切片通过复合纺丝制得预取向(POY)初生丝。纤维截面为“一”字形,“一”字部分由PBT导电母粒构成,其余部分由PET组分构成。纺丝速度为3 000 m/min。针对PBT导电母粒复合比例25%的POY聚酯抗静电纤维,在90℃下进行1.4倍牵伸,定型温度分别设为135,140,145℃和150℃;针对复合比例20%的POY聚酯抗静电纤维,在牵伸温度90℃,定型温度140℃条件下,分别进行1.3倍、1.4倍和1.5倍牵伸。

1.4 测试与表征

(1) SEM观察。PBT导电母粒通过双面导电胶固定在样品台上;母粒样品在液氮中脆断。给样品表面喷金处理后观察,加速电压为12 kV。

(2) TG分析。 N_2 气氛,升温范围为50~600℃,升温速率为50℃/min,样品质量为5~10 mg。

(3) DSC分析。 N_2 气氛,测试温度范围为100~240℃,样品质量为2~3 mg。通过式(1)计算PBT导电母粒的结晶度。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^*(1-w)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_c 为样品的结晶度; ΔH_m 为样品的结晶焓,单位J/g; ΔH_m^* 为PBT完全结晶的结晶焓,为145 J/g^[13];w为母粒中导电炭黑的质量分数。

(4) MFR测试。温度为280℃,毛细管直径为2.095 mm,砝码为5 kg。

(5)纤维导电性能测试。取一段10 cm长的纤维,在纤维两端粘上导电胶,采用数字超高阻微电流仪测试纤维10 cm间距的电阻值,测量3次,计算平均值。

(6)力学性能测试。参照GB/T 14344-2022,拉伸速度为500 mm/min,重复测量6次取平均值。

(7)流变性能测试。纯PBT测定温度为255℃,PBT导电母粒测定温度为245℃。剪切速率范围为50~1 000 s⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 PBT导电母粒的表面电阻及MFR

表1为不同CB含量的PBT导电母粒的表面电阻及MFR。从表1的测试结果可知,当CB质量分数从20%增至28%时,PBT导电母粒的表面电阻从431 Ω降至15.8 Ω,其导电性能得到显著改善。与此同时,由于PBT基体中CB含量增加,导电母粒的MFR会逐渐降低。

表1 不同CB含量的PBT导电母粒的表面电阻及MFR

Tab. 1 Surface resistance and MFR of PBT masterbatches with different CB contents

CB mass fraction/%	Surface resistance/Ω	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]
20	431.0	229.8
25	57.4	99.3
28	15.8	59.7

2.2 PBT导电母粒的流变性能测试

PBT导电母粒的流变特性可为聚酯抗静电纤维复合纺丝工艺参数的确定提供重要指导。因本研究中导电母粒基体为PBT,故对纯PBT与PBT导电母粒进行毛细管流变性能测试。通过对测试温度的探究,纯PBT在250℃条件下熔融塑化效果不佳,因此纯PBT的流变性能测试温度设定为255℃。而PBT导电母粒在245℃时可实现良好的熔融塑化,因此将其测试温度设定为245℃。

图1为纯PBT与不同CB含量的PBT导电母粒流变曲线。由图1可见,尽管纯PBT的测试温度比PBT导电母粒高10℃,但在相同剪切速率下,其熔体表观黏度远高于PBT导电母粒,这可能与PBT导电母粒经熔融挤出加工后特性黏度 η 的降低有关。

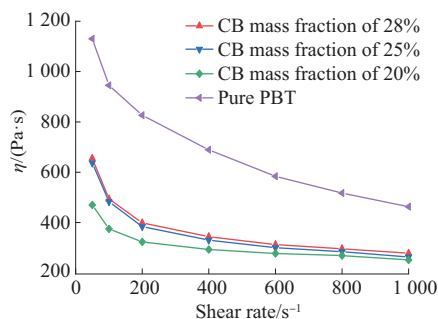


图1 纯PBT与不同CB含量的PBT导电母粒的流变曲线

Fig. 1 Rheological curves of pure PBT and PBT conductive masterbatches with different CB contents

具体而言,纯PBT特性黏度为1.3 dL/g,而经挤出加工后,含质量分数28%CB的PBT导电母粒的特性黏度降至0.75 dL/g,较纯PBT显著降低。

此外,不同CB含量的PBT导电母粒均表现出典型的剪切变稀行为,即其熔体表观黏度随剪切速率的升高而下降。这归因于在高剪切作用下,聚合物分子链的取向与解缠结过程被加速,从而降低了流动阻力。在本研究范围内,PBT导电母粒的表观黏度随剪切速率的变化呈现一致趋势:在低剪切速率区间内快速下降,而后随剪切速率进一步增大,下降趋势逐渐平缓。值得注意的是,随着CB含量的增加,PBT导电母粒的熔体表观黏度略有增大,但变化幅度较小。表明CB含量的改变对PBT熔体流动性的影响较弱。

2.3 PBT导电母粒的热稳定性分析

TG分析用于评估PBT导电母粒的热稳定性,其结果见图2和表2。由图2a可见,所有配方的导电母粒均呈现出单一失重阶段,该阶段归属于PBT基体的热分解。随着CB含量的增加,导电母粒的残炭率相应提高。其中,纯PBT树脂的5%失重温度($T_{5\%}$)为395.7℃;而添加CB后,PBT导电母粒的 $T_{5\%}$ 均有所升高,当CB质量分数为28%时,PBT导电母粒的 $T_{5\%}$ 达到最高值399.9℃,这说明CB的引入可提升母粒的热稳定性。

由图2b可知,与PBT导电母粒相比,纯PBT的热失重速率峰值温度更低,在430℃左右,且热失重速率最大。PBT导电母粒的热失重速率峰值温度均高于纯PBT,且随着CB含量增加,热失重速率峰值温度略有升高,上述结果进一步表明PBT导电母粒具有更优异的热稳定性。

2.4 PBT导电母粒的DSC分析

图3为不同CB含量的PBT导电母粒的DSC

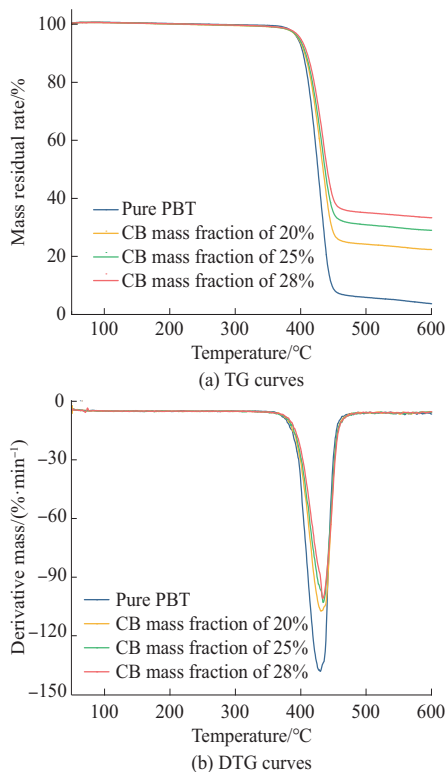


图2 不同CB含量PBT导电母粒的TG和DTG曲线

Fig. 2 TG and DTG curves of PBT conductive masterbatches with different CB contents

表2 不同CB含量的PBT母粒的TG分析数据

Tab. 2 TG analysis data of PBT masterbatches with different CB contents

Items	Pure PBT	CB mass fraction of 20%	CB mass fraction of 25%	CB mass fraction of 28%
$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	395.7	396.8	398.0	399.9
$T_p/^{\circ}\text{C}$	430.3	431.2	434.1	433.5
Char yield at 600 $^{\circ}\text{C}/\%$	3.71	22.36	28.98	33.32

Notes: $T_{5\%}$ is temperature at 5% weight loss; T_p is the maximum weight loss rate temperature.

曲线。由图3可见,纯PBT在降温过程中的结晶峰值温度为172.80 $^{\circ}\text{C}$,其结晶峰较宽且高温侧变化平缓,表明PBT熔体在降温结晶过程中起始结晶温度较低,且结晶速率较慢。相比之下,添加CB后,PBT导电母粒的结晶温度显著提升至194 $^{\circ}\text{C}$ 以上,较纯PBT提高约22 $^{\circ}\text{C}$,且结晶峰尖锐陡峭,说明CB作为异相成核剂可在较高温度下有效诱导PBT结晶。此外,随着CB含量增加,PBT导电母粒的结晶峰值温度从194.03 $^{\circ}\text{C}$ 小幅升至195.61 $^{\circ}\text{C}$,表明CB含量对PBT的结晶行为存在一定影响。

与纯PBT相比,添加CB的PBT导电母粒结晶度明显降低。纯PBT仅呈现一个结晶熔融峰,峰值

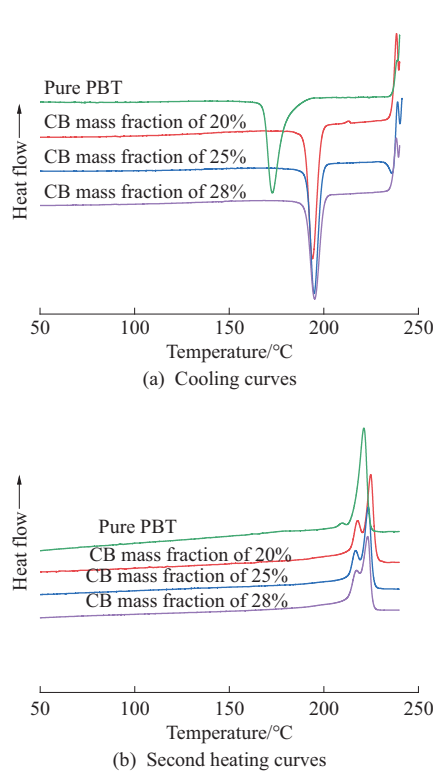


图3 不同CB含量PBT导电母粒的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of PBT conductive masterbatches with different CB contents

温度为221.15 $^{\circ}\text{C}$;而不同CB含量的PBT导电母粒在升温过程中均出现两个结晶熔融峰,且峰形基本一致。在217 $^{\circ}\text{C}$ 左右有一较小熔融峰,在223 $^{\circ}\text{C}$ 左右有一较大熔融峰。这可能是由于CB导致PBT分子链重排结晶时形成了部分不完善或亚稳定态晶体,此类晶体在较低温度下率先熔融,随后分子链重排形成晶格更完善的晶体,后者则在较高温度下熔融^[14-15]。

表3为不同CB含量的PBT母粒的结晶参数。由表3可知,CB对PBT结晶行为的影响较为显著,总体上较高浓度CB含量会导致PBT结晶度下降。

表3 不同CB含量的PBT母粒的结晶参数

Tab. 3 Crystallization parameters of PBT masterbatches with different CB contents

CB mass fraction/%	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$T_c/^{\circ}\text{C}$	$X_c/\%$
0	221.15	172.80	46.48
20	223.74	194.03	36.26
25	223.30	194.87	36.41
28	223.14	195.61	32.91

Notes: T_m is melting peak temperature; T_c is crystallization peak temperature; X_c is degree of crystallinity.

2.5 聚酯导电母粒的断面微观形貌

图4为CB质量分数分别为20%和28%的PBT

导电母粒的SEM图像。由图4可见,当CB质量分数为20%时,其在PBT基体中分散较为均匀,且粒径分布均一,主要以约100 nm的球形聚集体形式存在。当CB质量分数增至28%时,其在PBT基体中仍保持较好的分散性,但均一性略有下降,且球形聚集体尺寸略有增大;不过,CB球形聚集体的粒径均小于200 nm,本研究制备的POY聚酯导电纤维直径在25~26 μm ,该尺度的分散程度完全可满足纺丝加工的要求。

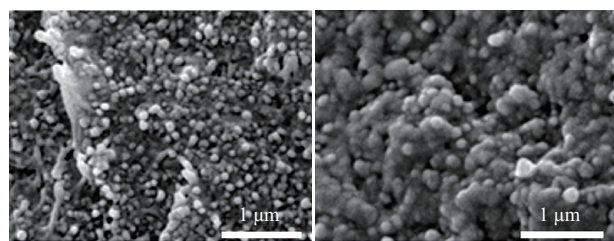


图4 不同CB含量的PBT导电母粒的SEM照片

Fig. 4 SEM photos of cross-sections of PBT conductive masterbatches with different CB contents

2.6 聚酯抗静电纤维的性能分析

基于前述对PBT导电母粒流变性能的分析,发现其在245 $^{\circ}\text{C}$ 时仍具有较低的熔体表现黏度。为使PBT导电母粒与PET的熔体黏度实现更好匹配,复合纺丝过程中工艺参数设定如下:PBT导电母粒加工温度为240 $^{\circ}\text{C}$,PET加工温度为305 $^{\circ}\text{C}$,纤维截面采用“一”字形,导电母粒复合比例分别为15%,20%,25%,30%,纺丝速度为3 000 m/min。其中,针对PBT导电母粒复合比例25%的POY聚酯抗静电纤维,在90 $^{\circ}\text{C}$ 下进行1.4倍牵伸,定型温度分别设为135,140,145 $^{\circ}\text{C}$ 和150 $^{\circ}\text{C}$;针对复合比例20%的POY聚酯抗静电纤维,在牵伸温度90 $^{\circ}\text{C}$,定型温度140 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,分别进行1.3倍、1.4倍和1.5倍牵伸。

图5为不同复合比例下聚酯抗静电纤维的力学性能测试结果。由图5可见,PBT导电母粒的复合比例对纤维力学性能影响显著,随着复合比例的提高,纤维的强度与断裂伸长率均呈下降趋势。这主要是由于PBT导电母粒中含有的大量CB会降低其自身力学性能,而抗静电纤维的力学性能主要由PET组分支撑,因此导电母粒复合比例越高,PET组分占比越低,纤维的强度与断裂伸长率也就越低。

图6为不同复合比例下聚酯抗静电纤维的单位长度电阻测试结果。由图6可见,由于纤维的抗静电性能主要由导电母粒组分赋予,因此随着导电母

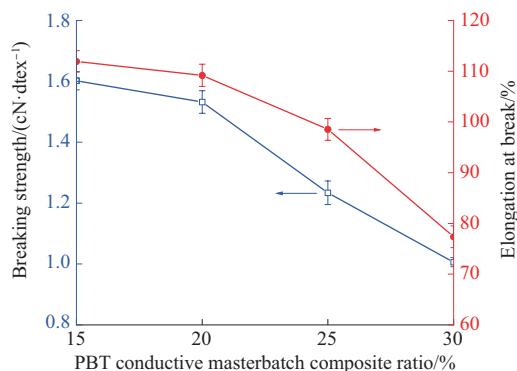


图5 PBT导电母粒复合比例对聚酯抗静电纤维力学性能的影响

Fig. 5 Effects of PBT conductive masterbatch composite ratio on mechanical properties of polyester antistatic fibers

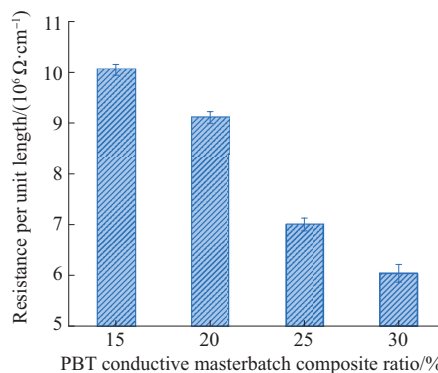


图6 PBT导电母粒复合比例对抗静电纤维单位长度电阻的影响

Fig. 6 Effects of PBT conductive masterbatch composite ratio on resistance per unit-length of polyester antistatic fibers

粒复合比例的提高,抗静电纤维的单位电阻逐渐降低,其抗静电性能相应提升。

图7为PBT导电母粒复合比例25%的聚酯抗静电纤维在1.4倍牵伸比下,定型温度分别为135,140,145,150 $^{\circ}\text{C}$ 条件下制备的抗静电纤维力学性能测试结果。由图7可知,定型温度对聚酯抗静电纤维断裂强度的调控作用更为关键,在研究范围内,定型温度为140 $^{\circ}\text{C}$ 时,抗静电纤维的断裂强度最高,

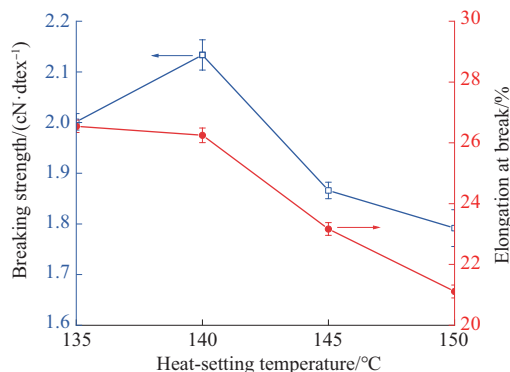


图7 热定型温度对抗静电纤维力学性能的影响

Fig. 7 Effects of heat-setting temperature on mechanical properties of conductive fibers

可达2.13 cN/dtex, 135 °C的定型温度下聚酯抗静电纤维断裂强度次之,而当定型温度升至145 °C及以上时,聚酯抗静电纤维的断裂强度明显降低。

图8为PBT导电母粒复合比例25%,牵伸比1.4倍的聚酯抗静电纤维在不同定型温度下的单位长度电阻变化。由图8可见,定型温度为135 °C和140 °C时,聚酯抗静电纤维的单位电阻最低,抗静电性能最优,综合考量聚酯导电纤维的力学性能与单位长度电阻,140 °C为适宜的定型温度。

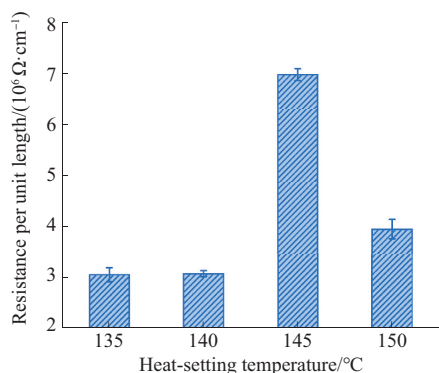


图8 不同热定型温度对抗静电纤维单位长度电阻的影响

Fig. 8 Effects of different heat-setting temperature on unit-length resistance of conductive fibers

考虑复合比例25%的聚酯抗静电纤维在本研究范围内,即使在较佳的牵伸工艺条件下,断裂强度最高仅能达到2.0 cN/dtex,为进一步提升纤维强度,在较佳的定型工艺条件下,基于20%复合比例的聚酯抗静电纤维来探究牵伸比对其力学性能的影响。

表4为聚酯导电母粒复合比例20%、牵伸温度90 °C、定型温度140 °C时,牵伸倍率分别为1.3, 1.4和1.5的测试结果。由表4可知,随着牵伸倍率的增大,抗静电纤维的断裂强度显著提升,最高可达2.76 cN/dtex,而断裂伸长率先提升后降低。此外,牵伸倍率的增大对纤维单位电阻的影响较为显著,一方面,牵伸会导致纤维直径减小;另一方面,牵伸作用会使纤维中导电组分的导电网络受到一定程度的破坏,因此牵伸倍率增大将导致纤维单位长度

表4 牵伸比对抗静电纤维力学性能与单位长度电阻的影响

Tab. 4 Effects of draft ratio on mechanical properties and unit-length resistance of antistatic fiber

Draw ratio	Breaking strength/(cN·dtex ⁻¹)	Elongation at break/%	Resistance per unit length/(10 ⁶ Ω·cm ⁻¹)
1.3	1.94	37.64	3.6
1.4	2.38	47.67	4.8
1.5	2.76	28.83	10.0

电阻变大,抗静电性能下降,由此可见,在导电纤维的制备过程中,须合理选择牵伸倍率^[16]。

3 结论

(1)采用熔融挤出工艺制备的PBT导电母粒,其特性黏度较纯PBT显著降低。与纯PBT相比,在相同剪切速率下PBT导电母粒的熔体表现黏度明显下降。

(2)CB作为异相成核剂,可提高PBT的结晶温度,且能改善PBT导电母粒的热稳定性。

(3)降低PBT导电母粒的复合比例,聚酯抗静电纤维的单位电阻增大,抗静电性能下降,抗静电纤维的力学性能有所改善;热定型温度在140 °C时聚酯抗静电纤维的强度较好;提高牵伸倍率可显著提升纤维的力学强度,但同时会导致其单位电阻增大,抗静电性能降低。综合抗静电性能和力学性能,在热定型温度在140 °C,牵伸倍率1.4时,PBT导电母粒复合比例20%的聚酯抗静电纤维强度和抗静电性能较好。

参考文献

- [1] 纪晓寰,孙宾,王鸣义. 聚酯纤维改性技术进展及在技术纺织品领域的应用趋势[J]. 纺织导报,2022(3):72-79.
JI Xiaohuan, SUN Bin, WANG Mingyi. Technology progress of polyester fiber modification and its application trend in technical textiles[J]. China Textile Leader, 2022(3):72-79.
- [2] 赵明良,宁新,邢明杰. 仿棉聚酯纤维及其制品的开发与研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2021,36(3):30-36.
ZHAO Mingliang, NING Xin, XING Mingjie. Development and research of the cotton-like polyester fibers and its products[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2021, 36(3):30-36.
- [3] 赵晓婷,金剑,王利平. 聚酯纤维原液着色技术的研究现状[J]. 合成纤维工业,2018,41(2):51-55.
ZHAO Xiaoting, JIN Jian, WANG Liping. Research status in dope dyeing technology for polyester fiber[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2018, 41(2):51-55.
- [4] 李珊珊,乔辉,胡蝶,等. 聚酯纤维抗静电改性的研究进展[J]. 现代化工,2017,37(9):17-20.
LI Shanshan, QIAO Hui, HU Die, et al. Research progress in anti-static modification for polyester fiber[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(9):17-20.
- [5] 孙福,钱建华,凌荣根,等. 炭黑复合导电聚酯纤维的研制[J]. 纺织学报,2010,31(1):1-4.
SUN Fu, QIAN Jianhua, LING Ronggen, et al. Preparation of conductive polyester fiber compounded with carbon black[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(1):1-4.
- [6] LI X Y, NIU D Y, XU P W, et al. High-toughness and antistatic

- PET/EMAG/CNTs nanocomposites from recycled sources by reactive compatibilization[J]. *Composites Communications*, 2024, 47. DOI:10.1016/j.coco.2024.101855.
- [7] XU Z T, LI Z F, LUO P D, et al. Novel approach of antistatic PET/nano-TiO₂ composites via Marangoni effect[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 708. DOI:10.1016/j.colsurfa.2024.135966.
- [8] 王家豪,于燕华.导电纤维在针织物中的应用及抗静电性能研究[J].*合成纤维*,2006,35(9):43–45.
WANG Jiahao, YU Yanhua. Application of conductive fiber in knitted fabrics and its antistatic property[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2006, 35(9):43–45.
- [9] DAI K, XU X B, LI Z M. Electrically conductive carbon black (CB) filled in situ microfibrillar poly(ethylene terephthalate)(PET)/polyethylene (PE) composite with a selective CB distribution[J]. *Polymer*, 2007, 48(3):849–859.
- [10] 金欣,肖长发,王永跃,等.碳黑系聚酯导电母粒的研究[J].*合成纤维*,2005,34(8):9–12,16.
JIN Xin, XIAO Changfa, WANG Yongyue, et al. Study on conductive PET master batches treated with carbon black[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2005, 34(8):9–12, 16.
- [11] 马倩,盛平厚,郑晓颀,等.浅色聚酰胺6抗静电纤维母粒制备及性能[J].*工程塑料应用*,2024,52(8):46–51,80.
MA Qian, SHENG Pinghou, ZHENG Xiaodi, et al. Preparation and properties of light-colored polyamide 6 antistatic fiber master-batch[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(8):46–51, 80.
- [12] 孙福,程贞娟,黄志超.复合纺丝用导电母粒的研制及其性能[J].*浙江工程学院学报*,2003,28(4):258–261.
SUN Fu, CHENG Zhenjuan, HUANG Zhichao. Preparation and performance of conducting master-batch for composite spinning [J]. *Journal of Zhejiang Institute of Science and Technology*, 2003, 28(4):258–261.
- [13] 田银彩,李世瑞,胡少辉.离子液体增容PP/PBT共混物[J].*工程塑料应用*,2020,48(12):128–132.
TIAN Yincui, LI Shirui, HU Shaohui. PP/PBT blends compatibilized by ionic liquids[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(12):128–132.
- [14] 盛平厚,丁筠,韩朝阳,等.PBT/纳米铜粉抗菌复合材料制备及其纺丝应用[J].*工程塑料应用*,2020,48(10):35–38,58.
SHENG Pinghou, DING Yun, HAN Zhaoyang, et al. Preparation of PBT/nano-copper powder antibacterial composites and its application in melt spinning[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(10):35–38, 58.
- [15] 李珊珊,乔辉,丁筠,等.酞菁蓝颜料对PET结晶性能的影响[J].*现代塑料加工应用*,2018,30(2):42–44.
LI Shanshan, QIAO Hui, DING Yun, et al. Effect of phthalocyanine pigments on crystallization properties of PET[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2018, 30(2):42–44.
- [16] 孙西超,陶凤仪,占海华.碳黑/聚酰胺皮芯型导电长丝的制备及其性能[J].*绍兴文理学院学报(自然科学)*,2015,35(10):66–70.
SUN Xichao, TAO Fengyi, ZHAN Haihua. Preparation and properties of carbon black/polyamide sheath-core conductive filament [J]. *Journal of Shaoxing University (Natural Science)*, 2015, 35(10):66–70.