

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.08.007

浅色聚酰胺 6 抗静电纤维母粒制备及性能

马倩^{1,2}, 盛平厚², 郑晓颀², 李睿², 刘明烁¹, 韩朝阳², 王世龙¹, 丁筠¹

(1. 北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029; 2. 中国纺织科学研究院有限公司生物源纤维制造技术国家重点实验室, 北京 100025)

摘要: 使用硬脂酸(SA)改性纳米锑掺杂二氧化锡包覆二氧化钛(ATO@TiO₂)作为浅色导电填料,采用熔融共混法制备浅色抗静电聚酰胺 6(PA6)纤维母粒。通过扫描电子显微镜、电阻率测试仪、测色仪、热重分析仪等研究 ATO@TiO₂在 PA6 基体中的分散情况及其对母粒导电性、白度、热稳定性的影响。实验结果表明,SA 改性剂显著提高了 ATO@TiO₂的疏水性,改善了 ATO@TiO₂与 PA6 基体相容性,并提高了 ATO@TiO₂在 PA6 中的分散均匀性;当 SA 质量分数为 0.5% 时,SA 改性 ATO@TiO₂(SA-ATO@TiO₂)接触角显著增加到 135.65°。当 SA-ATO@TiO₂体积分数为 50% 时,显著降低了 PA6 母粒电阻率,展现出优异的导电性。此外,SA-ATO@TiO₂的加入改善了 PA6 母粒的热稳定性,提高了 PA6 冷结晶温度。颜色测试表明,尽管 SA-ATO@TiO₂含量的增加使母粒明度略有下降,但材料仍保持较好的白度。采用复合纺丝法制备浅色 PA6 抗静电纤维,通过电阻率测试仪、单丝强力仪等研究改性前后 ATO@TiO₂纤维母粒对纤维力学性能和抗静电性能的影响。实验结果表明,与 ATO@TiO₂相比,SA-ATO@TiO₂制备的浅色 PA6 抗静电纤维在保持纤维强度的同时显著地降低了纤维单位电阻,纤维单位电阻下降为 $4.24 \times 10^9 \Omega/\text{cm}$ 。

关键词: 表面改性;聚酰胺 6;抗静电母粒;浅色;纳米 ATO@TiO₂

中图分类号: TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-353(2024)08-0046-06

Preparation and properties of light-colored polyamide 6 antistatic fiber masterbatch

MA Qian^{1,2}, SHENG Pinghou², ZHENG Xiaodi², LI Rui², LIU Mingshuo¹, HAN Zhaoyang², WANG Shilong¹, DING Yun¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. State Key Laboratory of Bio-based Fiber Manufacturing Technology, China Textile Academy, Beijing 100025, China)

Abstract : Nano titanium dioxide coated with antimony-doped tin oxide (ATO@TiO₂) functionalized with stearic acid (SA) was employed as a light-colored conductive filler for the preparation of light-colored antistatic polyamide 6 (PA6) fiber masterbatches via melt blending. The dispersion of ATO@TiO₂ in the PA6 matrix and its effects on the conductivity, whiteness, and thermal stability of the masterbatches were investigated by using scanning electron microscopy, resistivity tester, colorimeter, and thermogravimetric analysis. The experimental results indicate that SA modifier significantly enhances the hydrophobicity of ATO@TiO₂, the compatibility with PA6 matrix and the dispersion uniformity of ATO@TiO₂ in PA6. With SA content at 0.5wt%, the water contact angle of SA-modified ATO@TiO₂ (SA-ATO@TiO₂) markedly rises to 135.65°. When the volume fraction of SA-ATO@TiO₂ is 50%, the resistivity of the PA6 masterbatches is markedly reduced, demonstrating excellent conductivity. Furthermore, the incorporation of SA-ATO@TiO₂ augments the thermal stability of the PA6 masterbatches and increases the cold crystallization temperature of PA6. Color tests show that although the brightness of the masterbatches slightly decreases with an increase in SA-ATO@TiO₂ contents, the material maintains a good level of whiteness. Light-colored antistatic PA6 fibers were prepared using the composite spinning method, the impact of pre- and post- treatment ATO@TiO₂ fiber masterbatches on fiber properties was investigated by using single fiber tensiometer and resistivity tester. The findings demonstrate that compared to ATO@TiO₂, the fibers produced from SA-ATO@TiO₂ greatly reduce the resistance per unit length of the fibers while maintaining their strength, with the resistance decreasing to $4.24 \times 10^9 \Omega/\text{cm}$.

Keywords : surface modification ; polyamide 6 ; antistatic masterbatch ; light-colored ; nano ATO@TiO₂

通信作者: 丁筠, 博士, 副教授, 主要研究方向为聚合物功能改性材料和色母粒; 盛平厚, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为功能纤维材料的制备及产品开发

收稿日期: 2024-06-03

引用格式: 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.

MA Qian, SHENG Pinghou, ZHENG Xiaodi, et al. Preparation and properties of light-colored polyamide 6 antistatic fiber masterbatch[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 46-51.

聚酰胺(PA)因其优良的力学性能、耐化学性和耐磨性在汽车、电子和纺织等多个领域广泛应用,具有显著的经济和社会效益^[1-3]。但在实际应用中,PA存在导电性差、难以传递和释放静电等问题可能导致生产或安全事故^[4-6]。随着抗静电材料在航空、军事和智能纺织品等领域的需求不断扩大,单一黑/深色抗静电材料难以满足浅色抗静电材料的实际需求,浅色抗静电材料成为目前的研究热点^[7-8]。因此制备浅色高性能抗静电PA复合材料,从而避免聚合物的静电危害具有重要的研究价值。

通过纳米材料改性可以赋予PA本身所不具备的功能,例如抗菌性、导电性、光引导等功能^[9-10]。目前,采用低成本的无机化合物(SiO_2 , TiO_2)作为内核,具有高电导率及良好环境适应性的金属氧化物作为外壳的复合型浅色导电填料展现出巨大的工业应用潜力。锑掺杂二氧化锡(ATO)是目前应用较为广泛的浅色金属氧化物导电材料,具有较好的导电性和热稳定性^[11-12]。目前,浅色抗静电纤维通常需在较高的纳米导电粉体含量下才能表现出良好的导电性能,这对纳米导电粒子在纤维中的分散性提出了更高的要求。同时金属氧化物表面固有的亲水特性,使其与PA6基体的界面相容性较差,难以在PA中均匀分散,从而影响PA材料的导电性能和力学性能^[13]。硬脂酸(SA)是一类具有长碳链结构的脂肪酸,是常用的表面活性剂。因此,笔者采用SA对纳米锑掺杂二氧化锡包覆二氧化钛(ATO@TiO_2)填料进行有机化改性(SA-ATO@TiO_2)以解决纳米填料的分散及相容性问题,采用熔融共混法制备浅色PA6抗静电纤维母粒,然后通过复合纺丝法制备浅色PA6抗静电纤维。探究SA不同改性条件对 ATO@TiO_2 表面润湿性的影响,在此基础上研究 SA-ATO@TiO_2 添加量对母粒的导电性及结晶性等的影响,观察不同抗静电母粒的微观结构形貌,同时对母粒的热性能、抗静电性能和色彩性能进行测试。此外,对浅色PA6抗静电纤维微观形貌、力学性能和抗静电性能也进行了评价。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SA:分析纯,北京益利精细化学品有限公司;

无水乙醇:纯度99.9%,上海麦克林生化科技股份有限公司;

PA6:广东新会美达锦纶股份有限公司;

纳米 ATO@TiO_2 :自制。

1.2 主要设备及仪器

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6360,日本电子株式会社;

光学接触角测试仪:JC200DM,北京中仪科信科技有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IS-10,美国ThermoFisher公司;

热重(TG)分析仪:Pyris 1 TGA,美国Perkin-Elmer公司;

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

半导体电阻率测试仪:ST-2722,苏州晶格电子有限公司;

测色仪:Ci7600,爱色丽(上海)色彩科技有限公司;

双螺杆挤出机:CTE-20,科倍隆(南京)机械有限公司;

单丝强力仪:Instron2343,英国Instron公司;

纺丝机,自制。

1.3 样品制备

1.3.1 ATO@TiO_2 纳米粒子的制备与改性

采用共沉淀法制备 ATO@TiO_2 浅色导电填料^[14]。随后,称取一定质量的SA分散在适量无水乙醇中(分别配置成0.1%,0.5%,1.0%,1.5%,2.0%的溶液),在50℃下磁力搅拌10 min。利用表面喷涂的方法将含有SA的乙醇溶液喷涂在 ATO@TiO_2 纳米粒子表面,然后将 ATO@TiO_2 放入高速混合机中,充分搅拌2 min,使SA均匀地包覆在 ATO@TiO_2 表面,重复上述步骤5次后得到 SA-ATO@TiO_2 。

1.3.2 浅色PA6抗静电纤维母粒的制备

将PA6与导电纳米粒子真空干燥12 h,烘干后按照配方计量将原料加入高速混料机进行混合。将混合好的原料采用螺杆挤出,双螺杆温度设定为:一区:235℃,二区:245℃,三区、四区:250℃。熔体经拉条冷却吹干后切成颗粒。 ATO@TiO_2 或 SA-ATO@TiO_2 体积分数分别为40%,45%,50%,55%,60%。制备的母粒命名为 $\text{PA6}/x\text{ATO@TiO}_2$ 或 $\text{PA6}/x\text{SA-ATO@TiO}_2$,其中 x 代表 ATO@TiO_2 或 SA-ATO@TiO_2 在复合体系中的体积分数。

1.3.3 浅色PA6抗静电纤维制备

将导电母粒与PA6放入真空干燥箱中干燥后加

入纺丝机,通过复合纺丝制得初生丝,最后经过牵伸定型得到浅色PA6抗静电纤维。纺丝螺杆温度为:一区240℃,二区245℃,三区、四区:250℃。纺丝速度为4 000 m/min。

1.4 表征与测试方法

SEM观察:粉末样品通过双面导电胶固定在样品台上;母粒样品在液氮中淬断。给样品表面喷金处理后观察,加速电压为12 kV。

接触角测试:将粉末样品压制成光滑的圆片状,控制测试水滴大小为5 μL ,记录样品水接触角。

FTIR分析:样品采用衰减全反射模式,扫描范围为4 000~500 cm^{-1} ,扫描分辨率为4 cm^{-1} ,扫描次数为64次。

TG分析: N_2 气氛,升温范围为50~600℃,升温速率20℃/min,样品质量为5~10 mg。

DSC分析: N_2 气氛,测试范围为100~250℃,样品质量为2~3 mg。通过式(1)计算PA6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, J/g; ΔH_m^* 为PA6完全结晶的结晶焓, 230 J/g^[15]; w 为母粒中SA-ATO@TiO₂的质量分数。

电阻率测试:样品质量为0.5 g,测试压强为10 MPa,每个样品重复测量3次,计算平均值。

色彩性能测试:将母粒在250℃下压成薄片,每个样品选取3个不同位置进行测试,计算其平均值。

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。

2 结果与讨论

2.1 ATO@TiO₂改性

以SA为改性剂,探讨改性剂用量对ATO@TiO₂疏水性及电阻率的影响。接触角是反映ATO@TiO₂表面润湿性的重要参数,如图1所示。当水滴落在未改性的ATO@TiO₂纳米粒子表面时,大部分水被吸收,剩余部分则分布在纳米粒子表面,样品表现出较强亲水性,接触角仅为40.08°。当SA质量分数为0.5%时,SA-ATO@TiO₂接触角显著增加到135.65°,水在样品表面形成稳定液滴形状,ATO@TiO₂实现了由亲水性向疏水性的转变。当SA质量分数 $\geq 1.5\%$ 时,样品接触角大小趋于稳定。

图2为不同SA含量改性ATO@TiO₂的FTIR谱图和电阻率。如图2a所示,在2 914, 2 847 cm^{-1} 处出现的 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2$ 特征峰证实SA通过化学吸附的

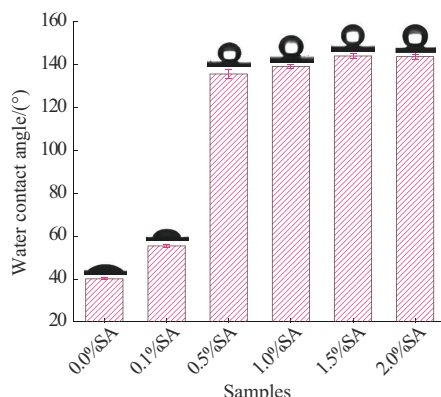
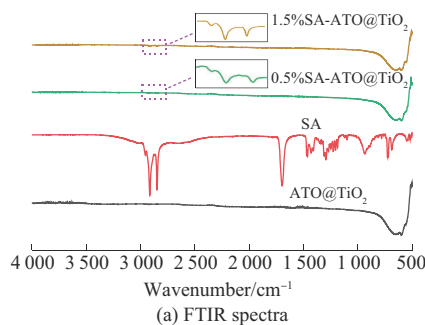


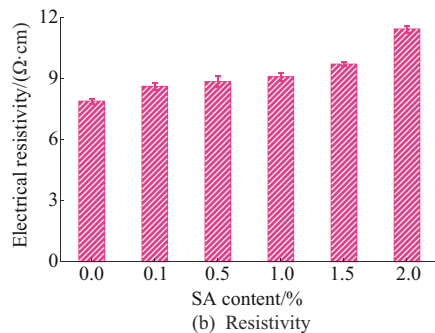
图1 不同SA含量改性ATO@TiO₂的接触角

Fig. 1 Water contact angle of ATO@TiO₂ modified with different SA contents

方式包覆在ATO@TiO₂上。由图2b可以看出,当SA质量分数小于1.5%时,随SA含量增加,SA-ATO@TiO₂电阻率变化不大。然而,当SA质量分数为2.0%时,样品电阻率增加到11.42 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。这是由于SA长碳链在ATO@TiO₂粒子表面密集分布,增强了对自由电子移动的阻碍。后续选择SA质量分数为1.5%的样品造粒。



(a) FTIR spectra



(b) Resistivity

图2 不同SA含量改性ATO@TiO₂的FTIR谱图和电阻率

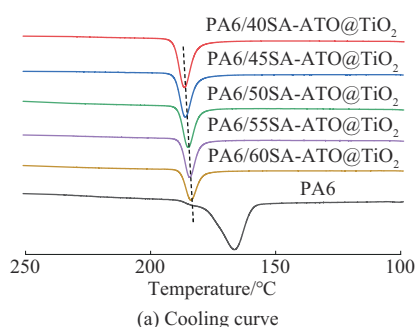
Fig. 2 FTIR spectra and resistivity of ATO@TiO₂ modified with different SA contents

2.2 浅色PA6抗静电纤维母粒性能研究

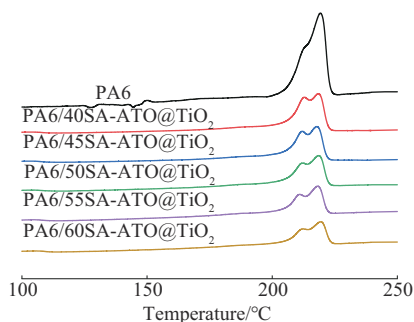
2.2.1 浅色PA6抗静电纤维母粒的DCS分析

图3和表1分别是不同SA-ATO@TiO₂含量纤维母粒的DSC升降温曲线和结晶参数。由图3和表

1可以看出,纯PA6在降温过程中的冷结晶峰值温度为 166.5°C ,与之相比,添加SA-ATO@TiO₂后的PA6母粒的冷结晶温度显著提高至 183°C 以上,表明SA-ATO@TiO₂粉体作为异相成核剂有效地在较高温度诱导了PA6的结晶。此外,在研究范围内,随着SA-ATO@TiO₂含量的增加,冷结晶峰值温度略有下降,从 186.5°C 降至 183.9°C ,说明SA-ATO@TiO₂含量对PA6结晶行为具有一定影响。与纯PA6相比,添加SA-ATO@TiO₂的PA6母粒显示出更高的结晶度(X_c)。此外,纯PA6在再升温过程中出现了主要的尖峰及次级的侧肩峰,这可能与PA熔体



(a) Cooling curve



(b) Second heating curve

图3 不同SA-ATO@TiO₂含量抗静电纤维母粒DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of antistatic fiber masterbatches with different

SA-ATO@TiO₂ contents表1 不同SA-ATO@TiO₂含量抗静电纤维母粒的结晶参数

Tab. 1 Crystallization parameters of antistatic fiber masterbatches

with different SA-ATO@TiO₂ contents

Samples	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$T_c/^{\circ}\text{C}$	$X_c/\%$
PA6	220.8	166.5	21.64
PA6/40SA-ATO@TiO ₂	218.7	186.5	23.06
PA6/45SA-ATO@TiO ₂	217.6	186.1	23.98
PA6/50SA-ATO@TiO ₂	218.9	185.0	24.66
PA6/55SA-ATO@TiO ₂	218.3	184.4	23.94
PA6/60SA-ATO@TiO ₂	219.4	183.9	24.51

Notes: T_m is melting temperature, T_c is crystallization temperature.

降温过程中形成的晶体不够完善有关,这些不完善的晶体在较低温度下熔融并重排,形成更规整的晶体结构,导致了高尖峰和较低温度的侧肩峰的出现^[16]。而SA-ATO@TiO₂的添加影响了PA6分子链

规整性,可能导致出现更低温度的尖峰和更明显的侧肩峰分离。

2.2.2 浅色PA6抗静电纤维母粒的断面微观形貌

为研究表面改性对ATO@TiO₂在PA6基体中分散性的影响,观察改性前后母粒断面的微观形貌。如图4所示,改性前的ATO@TiO₂在PA6基体中部分发生“脱落”现象。相比之下,改性后,低含量的SA-ATO@TiO₂在PA6中均匀分散,显示出良好的相容性。随着导电粉体含量的增加,虽有部分聚集,但聚集体尺寸小于 $1\mu\text{m}$,对纺丝加工的影响较小。此外,低含量的SA-ATO@TiO₂基体中,由于粒子间距离较远,不易形成有效的导电通路,这可能导致母粒具有较高的电阻率,这与图5中的电阻率测量值相符。

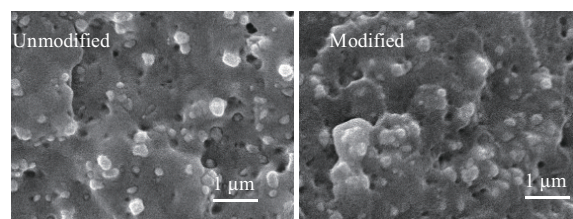
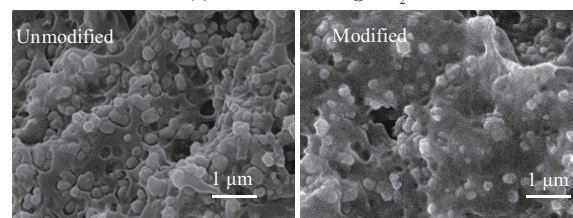
(a) PA6/45SA-ATO@TiO₂(b) PA6/55SA-ATO@TiO₂

图4 不同粉体含量母粒改性前、后断面SEM图

Fig. 4 SEM images of cross-sections of masterbatches before and after modification with different powder contents

2.2.3 浅色PA6抗静电纤维母粒的导电性能

不同含量ATO@TiO₂母粒电阻率测试结果如图5所示,可以看出,当导电粉体体积分数小于50%时,添加SA-ATO@TiO₂的母粒电阻率显著低于添加ATO@TiO₂的母粒,特别是在体积分数为40%时,二者电阻率相差一个数量级。这是因为SA-ATO@TiO₂在PA6中呈现更优越分散性,促使在较低体积分数下即可形成有效导电通路。当导电粉体体积分数达到50%时,添加SA-ATO@TiO₂的母粒电阻率降至 $3.7\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$,显示出较好的导电性。

然而,当导电粉体体积含量超过50%后,与未改性母粒相比,改性后的母粒电阻率略有增加,这一现象可能归因于SA-ATO@TiO₂的表面改性层。虽然表面改性提高了粉体的分散性,但在高含量

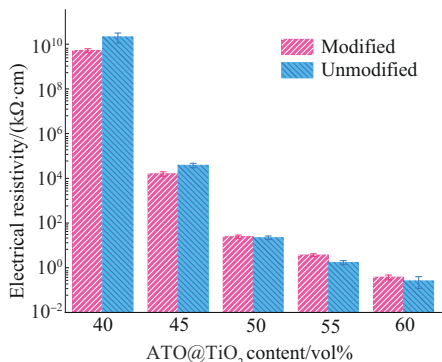


图5 改性前后抗静电纤维母粒电阻率

Fig. 5 Resistivity of antistatic fiber masterbatches before and after modification

下,SA层可能妨碍了电子在粉体之间的有效迁移,因此在达到或超过一定体积分数后,增加的SA-

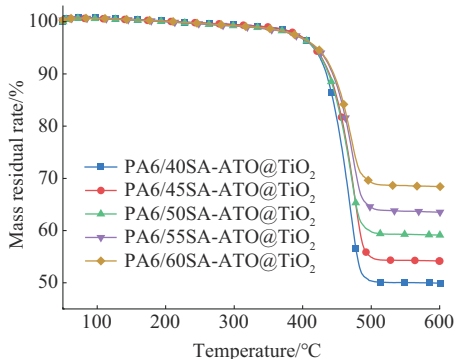
ATO@TiO₂在一定程度上阻碍了电子的自由流动,导致电阻率略有升高^[17]。因此,应结合其他性能指标,选择合适含量的改性导电母粒进行后续研究。

2.2.4 浅色PA6抗静电纤维母粒的热稳定性

为评估母粒的热稳定性,对其进行热重分析,结果显示在表2和图6中。由图6可知,不同SA-ATO@TiO₂含量母粒均只出现一个失重阶段,对应PA6的热分解。随着SA-ATO@TiO₂含量的增加,母粒的残炭量也相应提高。其中,PA6/40SA-ATO@TiO₂母粒的失重5%的温度($T_{5\%}$)为415.1℃,PA6/60SA-ATO@TiO₂母粒的 $T_{5\%}$ 提高至420.5℃。这说明SA-ATO@TiO₂的加入提高了母粒的热稳定性,满足后续纺丝工艺的温度要求。

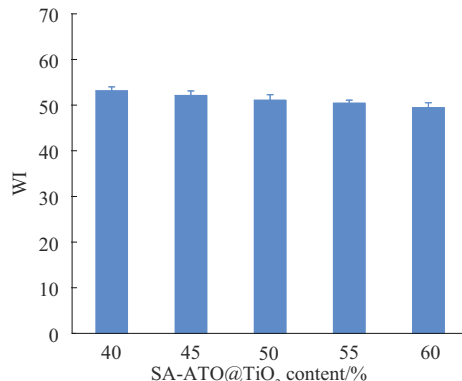
表2 不同PA6/ATO@TiO₂含量抗静电纤维母粒TG数据Tab. 2 TG analysis datas of antistatic fiber masterbatches with different PA6/ATO@TiO₂ contents

Item	PA6/40SA-ATO@TiO ₂	PA6/45SA-ATO@TiO ₂	PA6/50SA-ATO@TiO ₂	PA6/55SA-ATO@TiO ₂	PA6/60SA-ATO@TiO ₂
$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	415.1	416.4	415.8	419.5	420.5
Char yield at 600 $^{\circ}\text{C}/\%$	50.36	54.87	59.75	64.40	69.24

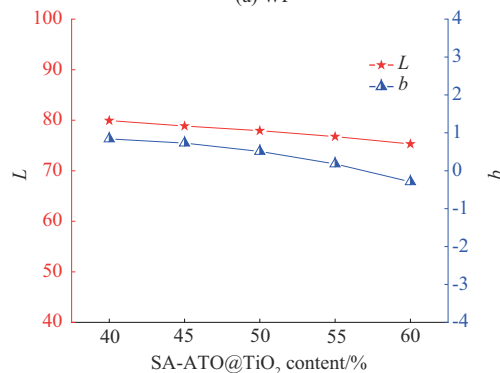
图6 不同SA-ATO@TiO₂含量抗静电纤维母粒的TG曲线Fig. 6 TG curves of antistatic fiber masterbatches with different SA-ATO@TiO₂ contents

2.2.5 浅色PA6抗静电纤维母粒的色彩性能

对于PA6抗静电纤维母粒而言,色彩性能是评价其白度和分散性的重要指标。CIE白度(WI)和明度(L)值越大,表示母粒对光的反射率越高,其白色色泽度越好^[18],结果如图7所示,随着SA-ATO@TiO₂含量增加,母粒的WI和L值略有降低,但材料仍保持较好的白度。当SA-ATO@TiO₂体积分数增加到60%时,白度从53.13下降到49.7,明度从79.3下降到75.3。 b 值代表蓝黄相, b 值越小,样品越蓝。由图7b可看出,随SA-ATO@TiO₂含量增加,抗静电母粒的 b 值呈下降趋势,母粒更偏蓝相。



(a) WI



(b) L and b values

图7 不同SA-ATO@TiO₂体积分数时抗静电纤维母粒的WI及L,b值Fig. 7 WI and L and b values of antistatic fiber masterbatches with different SA-ATO@TiO₂ contents

2.3 浅色PA6抗静电纤维性能研究

采用复合纺丝工艺,分别以PA6/55ATO@TiO₂

和PA6/55SA-ATO@TiO₂抗静电纤维母粒作为导电组分来进行浅色抗静电纤维的制备,复合纺丝顺利,纺丝过程中无毛丝、断丝现象,纤维截面复合良好。改性前后纤维性能指标见表3。由表3可以看出,相较于未改性抗静电纤维,改性后纤维强度保持在3.0 cN/dtex以上。同时单位电阻降低一个数量级,达到 $4.24 \times 10^9 \Omega/\text{cm}$ 。这表明经SA改性后的导电粉体与PA6基体相容性得到改善,有利于提高纤维的抗静电性能和力学性能。

表3 PA6抗静电纤维性能对比

Tab. 3 Comparison of the properties of PA6 antistatic fibers

Samples	Tensile strength/ (cN·dtex ⁻¹)	Resistance per unit length/ ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)
F _U	3.08	5.06×10^{10}
F _M	3.16	4.24×10^9

Notes: “F_U” refers to antistatic fibers produced from unmodified powder fiber masterbatch; “F_M” denotes antistatic fibers made from modified powder fiber masterbatch.

3 结论

(1)通过SA对ATO@TiO₂进行有机化改性,当SA质量分数为0.5%时,ATO@TiO₂接触角增加到135.65°,实现了由亲水性向疏水性的转变。

(2)与ATO@TiO₂相比,SA-ATO@TiO₂在PA6基体中的分散性和相容性得到改善。当SA-ATO@TiO₂体积分数达到40%时,相比未改性母粒,电阻率可降低一个数量级;当SA-ATO@TiO₂含量为50%时,母粒电阻率降低至3.7 k $\Omega \cdot \text{cm}$,显示出优异的导电性。

(3)SA-ATO@TiO₂作为异相成核剂,提高了PA6的冷结晶温度,改善了PA6纤维母粒的热稳定性。尽管SA-ATO@TiO₂含量的增加会导致纤维母粒的明度略有下降,但整体上保持了较好的白度。

(4)采用PA6/55SA-ATO@TiO₂抗静电母粒进行复合纺丝,成功制备了强度3.0 cN/dtex以上,抗静电性能为 $4.24 \times 10^9 \Omega/\text{cm}$ 的浅色PA6抗静电纤维,具备较好的应用前景。

参考文献

- [1] 韩顺涛,周翔,李如意,等. 聚酰胺6/纤维复合材料的进展[J]. 塑料, 2023, 52(5): 118–122.
HAN Shuntao, ZHOU Xiang, LI Ruyi, et al. Progress of polyamide 6/fiber composite[J]. Plastics, 2023, 52(5): 118–122.
- [2] 徐小伟,闫超,田亦瑶,等. 芳香族聚酰胺纤维在航空领域的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(1): 21–28.
XU Xiaowei, YAN Chao, TIAN Yiyao, et al. Research progress of

- aromatic polyamide fiber in aviation field[J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53(1): 21–28.
- [3] LIAO G X, LI Z X, LUAN C C, et al. Additive manufacturing of polyamide 66: effect of process parameters on crystallinity and mechanical properties[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(1): 191–200.
- [4] 陈艳波,王博,李阳. 一起静电火灾事故的调查与视频分析[J]. 武警学院学报, 2020, 36(8): 42–46.
CHEN Yanbo, WANG Bo, LI Yang. Investigation and video analysis of a fire caused by static electricity[J]. Journal of China People's Police University, 2020, 36(8): 42–46.
- [5] CHEN C L, ZHAO X W, YE L. Polyoxymethylene/carbon nanotube self-assembly networks with improved electrical conductivity for engineering functional structural materials[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(9): 9 606–9 615.
- [6] FAN L H, TAN Y S, AMESIMEKU J, et al. A novel functional disperse dye doped with graphene oxide for improving antistatic properties of polyester fabric using one-bath dyeing method[J]. Textile Research Journal, 2020, 90(5-6): 655–665.
- [7] 刘婉婉. 纤维用浅色ATO@TiO₂导电晶须的制备及性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
LIU Wanwan. Preparation and properties of fiber used conductive ATO@TiO₂ whisker with light color[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [8] XU Z A, WANG J K, ZHU Y N, et al. Preparation and properties of light-colored antistatic ATZO@TiO₂/PAN fiber[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2023, 38(4): 766–770.
- [9] YETISEN A K, QU H, MANBACHI A, et al. Nanotechnology in textiles[J]. ACS nano, 2016, 10(3): 3 042–3 068.
- [10] BAIG N, KAMMAKAKAM I, FALATH W. Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges[J]. Materials Advances, 2021, 2(6): 1 821–1 871.
- [11] 王亚男. TiO₂复合氧化锡锑的可控制备及其导电性能研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
WANG Yanan. Controlled Fabrication of TiO₂-based antimony doped tin oxide composite and its electrical conductivity[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [12] WANG Y N, QIAN J H, XING J J, et al. Fabrication of core-shell structured TiO₂@ Sb-SnO₂ with improved electroconductivity[J]. Journal of materials science, 2020, 55(9): 3 871–3 883.
- [13] GAO C Q, GUO M Y, LIU Y K, et al. Surface modification methods and mechanisms in carbon nanotubes dispersion[J]. Carbon, 2023: 118–133.
- [14] 王利平,蒋佳岑,郑晓岷,等. ATO-TiO₂浅色导电粉体的可控制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(S1): 241–245, 250.
WANG Liping, JIANG Jiachen, ZHENG Xiaodi, et al. Controllable preparation and properties of ATO-TiO₂ light-colored conductive powde. [J]. New Chemical Materials, 2024, 52(S1): 241–245, 250.

(下转第80页)