



# 凉感纤维用改性聚乙烯切片的制备与性能

黄宜坤<sup>1</sup>,翁 鸣<sup>1</sup>,陈红伟<sup>2</sup>,郭静雯<sup>1</sup>,李 蓉<sup>2</sup>,王秀华<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室,杭州 310018;  
2. 浙江古纤道股份有限公司,绍兴 312030)

**摘 要:** 为制备低成本、高导热系数的凉感纤维用切片,以硅烷偶联剂乙烯基三甲氧基硅烷(A171)对云母(Mica)、氮化铝(AlN)粉体进行表面处理,再通过熔融共混对高密度聚乙烯(HDPE)进行改性,制备得到改性聚乙烯切片。采用纳米粒度仪对表面处理前后的 Mica、AlN 粉体的粒径分布进行分析,通过热重分析仪、示差扫描量热仪、热台偏光显微镜和导热系数仪对改性 HDPE 切片的热稳定性、结晶度、结晶形态和导热性能进行表征。结果表明:经 A171 表面处理后,Mica 粉体的平均粒径由 460 nm 变为 380 nm,AlN 粉体的平均粒径由 280 nm 变为 230 nm,粉体的平均粒径减小,粒径分布变窄;当添加 2.0%复配粉体后,HDPE 的热稳定性增加,结晶度由 64.5%提升至 76.5%,球晶尺寸减小,导热系数由 0.290 W/(m·K)提升至 0.424 W/(m·K)。该结果可为凉感纤维用切片的产业化提供参考。

**关键词:** 高密度聚乙烯;云母;氮化铝;共混改性;结晶度;导热性能

**中图分类号:** TQ342

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2023) 01-0001-08

**引文格式:**黄宜坤,翁鸣,陈红伟,等. 凉感纤维用改性聚乙烯切片的制备与性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(1):1-8.

**Reference Format:** HUANG Yikun, WENG Ming, CHEN Hongwei, et al. Preparation and properties of modified polyethylene slices for cooling fiber[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(1): 1-8.

## Preparation and properties of modified polyethylene slices for cooling fiber

HUANG Yikun<sup>1</sup>, WENG Ming<sup>1</sup>, CHEN Hongwei<sup>2</sup>, GUO Jingwen<sup>1</sup>, LI Rong<sup>2</sup>, WANG Xiuhua<sup>1</sup>

(1. National Engineering Lab for Textile Fiber Materials and Processing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Guxiandao Incorporated Company, Shaoxing 312030, China)

**Abstract:** In order to fabricate slices for cooling fibers with low cost and high thermal conductivity, modified polyethylene slices were prepared through surface treatment by Mica and AlN powder with silane coupling agent vinyl trimethoxysilane (A171), followed by modification of high density polyethylene (HDPE) by melt blending. The particle size distributions of the modified Mica and AlN powder were analyzed by a nano particle size analyzer. The thermal stability, crystallinity, crystal morphology and thermal conductivity of the modified HDPE slices were characterized by thermogravimetric analyzer, differential scanning calorimeter, hot stage polarizing microscope, and thermal conductivity tester. The results showed that the average particle sizes of the powder decreased (from 460 nm to 380 nm for Mica powder, and from 280 nm to 230 nm for AlN powder) and the particle size distributions became narrower after surface treatment with A171. With the addition of 2.0% compound powder, the thermal stability of

收稿日期: 2022-03-09 网络出版日期: 2022-06-02

基金项目: 浙江省公益技术应用研究计划项目(LGG21E030012)

作者简介: 黄宜坤(1997—),男,安徽淮南人,硕士研究生,主要从事改性功能纤维方面的研究。

通信作者: 王秀华, E-mail: wxiuhua@126.com

HDPE grew and the crystallinity rose from 64.5% to 76.5%, the spherulite size decreased, and the thermal conductivity grew from 0.290 W/(m·K) to 0.424 W/(m·K). The results obtained in this study provide a reference for the industrialization of slices for cooling fiber.

**Key words:** high density polyethylene; Mica; aluminum nitride; blend modification; crystallinity; thermal conductivity

# 0 引 言

功能性纤维<sup>[1]</sup>的开发与利用是中国纺织行业发展的重要趋势之一,其中凉感纤维在夏季服饰、床上用品等领域应用广泛,受到市场的青睐。凉感纤维<sup>[2]</sup>以导热性能良好的聚合物制成,常见的纤维用聚合物的导热系数从高到低依次为:超高分子量聚乙烯(UHMWPE)、高密度聚乙烯(HDPE)、聚酰胺6(PA6)、聚酯(PET)<sup>[3]</sup>。UHMWPE 导热系数高,但较高的价格使其应用受到了影响。与 UHMWPE 相比,HDPE 具有易加工、成本低的优势,且导热系数高于大多数热塑性高聚物,可以作为基体材料用于制备凉感纤维<sup>[4-5]</sup>,若向 HDPE 中添加导热系数更高的凉感粉体,则有望进一步提高纤维的导热系数。目前,常用的凉感粉体有云母(Mica)、玉石、氮化硼(BN)、氮化铝(AlN)等。如魏洋<sup>[6]</sup>向 PA6 切片中添加 Mica 粉体制备 Mica/PA6 复合纤维,接触凉感系数可提升至 0.139 J/(cm<sup>2</sup>·s);Gao 等<sup>[7]</sup>向聚乙烯醇切片中添加 BN 粉体后制得 BN/聚乙烯醇复合纤维,所制织物的导热系数比商用棉织物高 55.0%;余涵等<sup>[8]</sup>向 PET 切片中添加玉石粉体后,通过熔融纺丝制备了具有凉爽舒适性的玉石/PET 复合纤维。在上述凉感粉体中,Mica 和玉石的导热系数偏低,而 BN 和 AlN 成本偏高。因此,对凉感粉体进行优化配置,兼顾纤维的导热系数提升与成本降低,成为当前研发凉感纤维面临的首要问题。

本文以 HDPE 为基体,Mica、AlN 复配粉体为改性剂,经乙烯基三甲氧基硅烷(A171)表面处理后的粉体与 HDPE 切片通过双螺杆挤出机熔融共混挤出,制备改性 HDPE 切片。探讨了 A171 表面处理对 Mica、AlN 粉体粒径分布的影响,研究了复配粉体的添加对 HDPE 热稳定性、结晶度、结晶形态和导热性能的影响等。本文拟制备成本低、导热性能优异的凉感纤维用切片,为凉感纤维的产业化提供借鉴。

# 1 实验部分

## 1.1 主要原料与设备

HDPE 切片(抚顺石化 2911,中国石油抚顺石

化公司);Mica(纳米级,灵寿县东鑫矿产品加工厂);AlN(纳米级,邦瑞新材料科技有限公司);A171(分析纯,上海麦克林生化科技有限公司)。

双螺杆挤出机(HAAKE PolyLab OS 型,德国哈克股份有限公司);傅里叶红外光谱(Nicolet 5700 型,美国热电公司);纳米粒度仪(Nano ZS 型,英国马尔文仪器有限公司);扫描电子显微镜(EVO 18 型,德国蔡司仪器公司);示差扫描量热仪(DSC1 型,瑞士梅特勒-托利多公司);热重分析仪(TGA 型,瑞士梅特勒-托利多公司);热台偏光显微镜(BX53 型,日本 Olympus 公司);导热系数仪(TPS 2500 S 型,瑞典 Hot Disk 公司)。

## 1.2 样品制备

### 1.2.1 Mica、AlN 粉体的表面处理

取 50 gMica(AlN)粉体于三颈烧瓶中,加入 250 mL 无水乙醇,用甲酸调节 pH 至 3~6,超声分散 1 h,后于 65 ℃油浴中恒温搅拌 1 h;将质量分数占凉感粉体 1.5%的 A171 置于 20 mL 无水乙醇中超声分散 1 h;将经超声分散的 A171 乙醇溶液加入三颈烧瓶中,搅拌反应 3 h,后经清洗、蒸发溶剂、干燥、研磨,得到表面处理后的云母(SMica)、氮化铝(SAlN)粉体。

### 1.2.2 改性 HDPE 切片的制备

将一定比例的凉感粉体与 HDPE 在双螺杆挤出机中进行熔融挤出造粒,挤出温度为 170 ℃,具体比例见表 1。

表 1 改性 HDPE 切片配方

样品编号	质量分数/%				
	HDPE	Mica	SMica	AlN	SAlN
HDPE	100.0	—	—	—	—
Mica/HDPE	98.0	2.0	—	—	—
AlN/HDPE	98.0	—	—	2.0	—
SMica/HDPE	98.0	—	2.0	—	—
SAlN/HDPE	98.0	—	—	—	2.0
SMica/SAlN/HDPE-1	98.0	—	1.5	—	0.5
SMica/SAlN/HDPE-2	96.0	—	3.0	—	1.0

## 1.3 表征与测试

通过傅里叶红外光谱仪对表面处理前后的 Mica、AlN 粉体进行定性分析,扫描范围为 4000~

500 cm<sup>-1</sup>;采用纳米粒度仪对表面处理前后的 Mica、AlN 粉体进行粒径、Zeta 电位测试,粉体的固含量分别为 1 g/1000 mL、1 g/10000 mL;采用扫描电子显微镜对改性 HDPE 切片进行截面观测,扫描电压为 10 kV。

采用示差扫描量热仪对改性 HDPE 切片进行结晶性能测试,测试温度范围为 25~160 ℃,升降温速率为 10 ℃/min;采用热重分析仪对改性 HDPE 切片进行热稳定性测试,测试温度范围为 25~600 ℃,升温速率为 10 ℃/min。

采用热台偏光显微镜对改性 HDPE 切片进行等温结晶形态观测,样品加热至 150 ℃恒温 3 min,后降至 128 ℃等温结晶。

采用导热系数测试仪根据国际标准 ISO 22007-2 (*Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity—Part 2: Transient plane heat source (hot disk) method*)对改性 HDPE 切片进行导热系数测试,样品上下面测试温度分别为 35、

25 ℃,测试环境为 25 ℃。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面处理前后 Mica、AlN 粉体的性能分析

#### 2.1.1 红外光谱分析

图 1 为经 A171 表面处理前后的 Mica、AlN 粉体的红外光谱图。从图 1 可以看到,经 A171 表面处理后的 SMica、SAlN 粉体的峰型与处理前相比发生了明显的变化,相较于 Mica 粉体,SMica 粉体的红外光谱在 1639 cm<sup>-1</sup> 和 2958 cm<sup>-1</sup> 出现了代表 C=C 键和—CH<sub>3</sub> 键的伸缩振动峰,且 1075 cm<sup>-1</sup> 处 Si—O 键的伸缩振动峰强度有所增加;相较于 AlN 粉体,SAIN 粉体的红外光谱在 1075 cm<sup>-1</sup>、1636 cm<sup>-1</sup> 和 2963 cm<sup>-1</sup> 处出现了代表 Si—O 键、C=C 键和—CH<sub>3</sub> 键的伸缩振动峰。这是由于 A171 红外光谱中含有代表 Si—O 键、C=C 键和—CH<sub>3</sub> 键的伸缩振动峰<sup>[9]</sup>,说明硅烷偶联剂 A171 已成功接枝到 AlN、Mica 的表面。

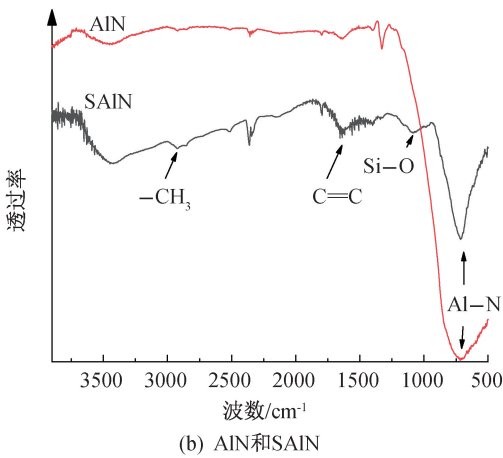
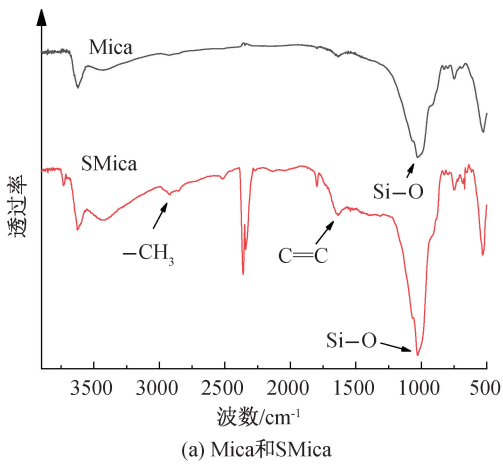


图 1 AlN 和 Mica 粉体表面处理前后的红外光谱图

#### 2.1.2 Zeta 电位分析

Zeta 电位是粒子之间排斥力强度的度量,Zeta 电位绝对值越大,粒子越倾向于分散,Zeta 电位绝对值越小,粒子越倾向于聚集<sup>[10]</sup>。表 2 为经 A171 表面处理前后的 Mica、AlN 粉体在固含量为 1 g/10000 mL 时的 Zeta 电位数据结果。由表 2 可知,Mica 粉体表面处理前后的 Zeta 电位分别为 3.7、-5.4 mV,AlN 粉体表面处理前后的 Zeta 电位分别为 -4.7、-47.2 mV,经 A171 表面处理后的 SMica、SAIN 粉体较未处理的 Mica、AlN 粉体的 Zeta 电位绝对值均增大,说明 SMica、SAIN 粉体表面的电负性增大,相同电荷极性的粒子之间的排斥力增大,纳米粉体之间的团聚得到了改善<sup>[11]</sup>。

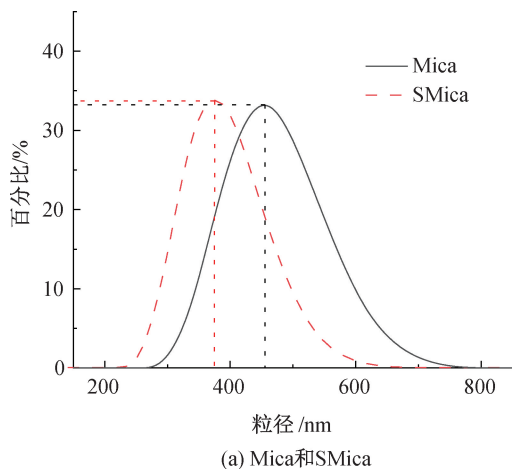
表 2 Mica、AlN 粉体表面处理前后的 Zeta 电位

粉体	Zeta 电位/mV
Mica	3.7
SMica	-5.4
AlN	-4.7
SAIN	-47.2

#### 2.1.3 粒径分布分析

图 2 为经 A171 表面处理前后的 Mica、AlN 粉体在固含量为 1 g/1000 mL 时的粒径分布图。如图 2 所示,Mica 粉体表面处理前后的平均粒径分别为 460、380 nm,AlN 粉体表面处理前后的平均粒径分别为 280、230 nm。这是因为 Mica、AlN 粉体为纳米级粉体,比表面积大、表面能高,易发生聚集成

团聚体,经 A171 表面处理,粉体表面能降低,团聚体比例减少,表现为粉体的平均粒径减小。因此



经 A171 表面处理,SMica、SAlN 粉体的平均粒径均减小,纳米粉体的粒径分布变窄。

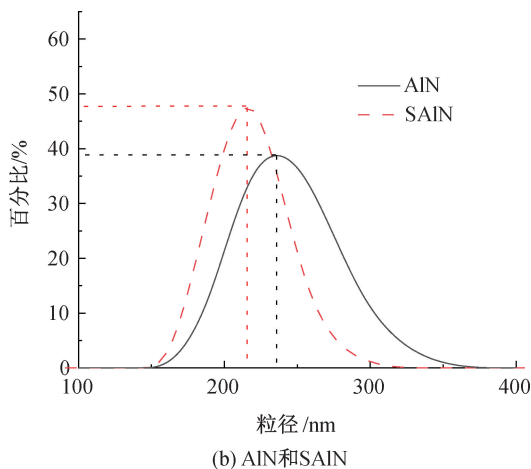
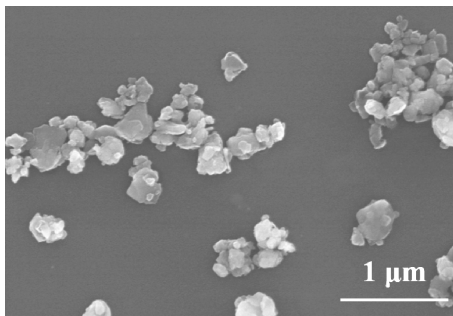


图 2 Mica、AlN 粉体改性前后的粒径分布曲线

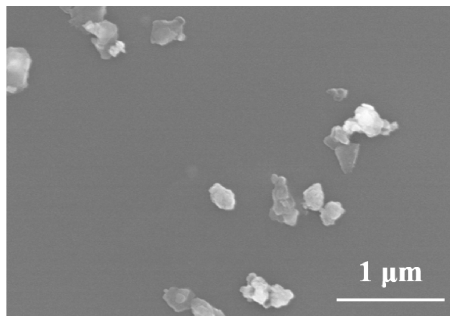
#### 2.1.4 Mica、AlN 粉体 SEM 分析

图 3 为 Mica、SMica、AlN、SAlN 粉体的扫描电镜图。由图 3 可知,Mica、AlN 粉体聚集形成团聚体,团聚现象严重,而 SMica、SAlN 粉体团聚体的比例减少,团聚现象得到改善。这是因为 Mica、AlN

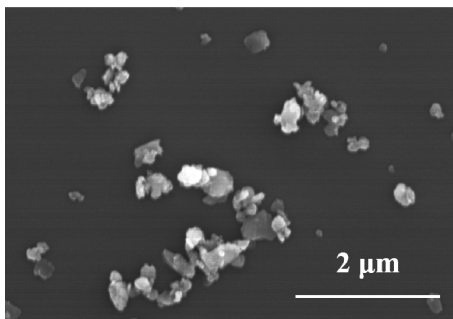
粉体的表面能高,粉体之间易相互吸引聚集形成团聚体,经 A171 表面处理,SMica、SAlN 粉体表面覆盖有硅烷偶联剂小分子,增大了粉体之间的排斥力,粉体聚集的难度增大,团聚现象得到改善。



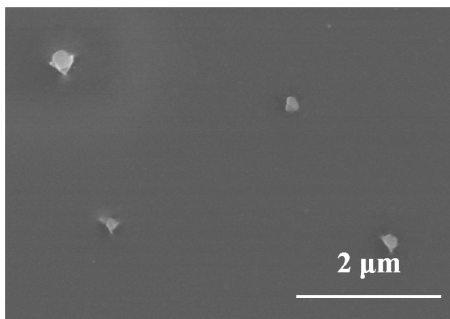
(a) Mica



(b) SMica



(c) AlN



(d) SAlN

图 3 Mica、AlN 粉体改性前后的 SEM 图

## 2.2 改性 HDPE 切片的性能分析

### 2.2.1 形貌分析

图 4 为 Mica/HDPE、SMica/HDPE、AlN/HDPE、SAlN/HDPE、SMica/SAlN/HDPE-1 切片的脆断截面扫描电镜图。由图 4(a)—(d) 可知,Mica/HDPE 切片中的 Mica 粉体和 AlN/HDPE 切

片中的 AlN 粉体有部分以团聚体的形式存在,Mica、AlN 粉体与 HDPE 两相界面处存在较多缺陷;而 SMica/HDPE 切片中的 SMica 粉体和 SAlN/HDPE 切片中的 SAlN 粉体在 HDPE 中的团聚体比例减少,SMica、SAlN 粉体与 HDPE 两相界面处存在的缺陷明显减少;如图 4(e) 所示,在



SMica/SAIN/HDPE-1 切片中,粒径较小的 SAIN 粉体分布在粒径较大的 SMica 粉体之间,两种粉体在 HDPE 基体中实现较为均匀的穿插分布,分散性较好。这是因为 Mica、AlN 粉体经 A171 表面处理,纳米粉体表面覆盖了乙烯基基团,乙烯基基团一

方面增大了纳米粉体之间的排斥性,减少了纳米粉体之间的团聚,另一方面增大了与 HDPE 的相容性,减少了两相之间的界面缺陷<sup>[12-13]</sup>。故经 A171 表面处理,SMica、SAIN 粉体在 HDPE 基体中的分散性能得到了改善。

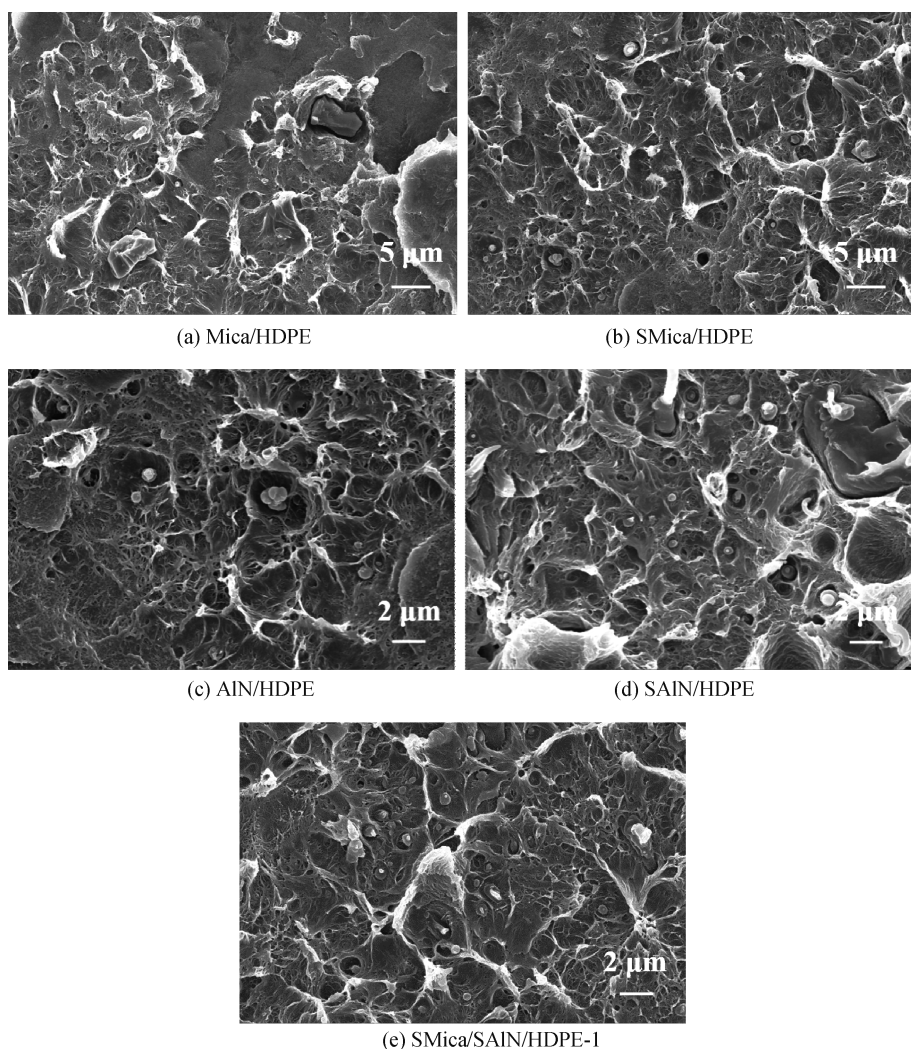


图 4 改性 HDPE 切片的脆断截面扫描图

### 2.2.2 结晶性能分析

图 5 为改性 HDPE 切片的 DSC 升、降温曲线图,表 3 为改性 HDPE 切片的 DSC 数据。由图 5 和表 3 可知,改性 HDPE 切片的热结晶峰温度为 117~119 °C,比纯 HDPE 的热结晶峰温度提高了 5~8 °C,添加不同种类粉体的改性切片之间的热结晶峰温度相差不大。说明随着纳米粉体的添加,HDPE 大分子链可在更高的温度下进行结晶。纯 HDPE 的熔融峰温度为 133 °C,而随着 Mica、AlN 粉体的添加,改性 HDPE 切片的熔点变化不大,熔融峰温度增加了 1~3 °C。

由表 3 还可知,纯 HDPE 的结晶度为 64.5%,而改性 HDPE 切片的结晶度为 76.5%~79.1%,相

较于纯 HDPE 提高了 12.0%~15.0%。这主要是因为随着 Mica、AlN 粉体的添加,HDPE 由均相成核变成了异相成核,即 Mica、AlN 粉体在 HDPE 中起到异相晶核的作用,因此随改性切片内晶核的数量增加,改性 HDPE 切片的结晶度增大<sup>[14]</sup>。纳米粉体经 A171 表面处理,SMica/HDPE、SAIN/HDPE、SMica/SAIN/HDPE-1、SMica/SAIN/HDPE-2 切片的结晶度较 Mica/HDPE、AlN/HDPE 切片无明显提升。

### 2.2.3 热稳定性分析

图 6 为改性 HDPE 切片的 TG、DTG 曲线,表 4 为改性 HDPE 切片的 TG 数据。由图 6(a)可知,纯 HDPE 的残炭量为 2.0%,而添加了 2.0%、4.0%纳

米粉体的改性 HDPE 切片残炭量分别为 4.0%、6.0%，与纳米粉体的添加量相吻合。由图 6(b)与表 4 可知，纯 HDPE 的失重 1.0%时的温度、失重 5.0%时的温度与最大失重速率时的温度分别为

431 ℃、459 ℃和 479 ℃，而添加了纳米粉体的改性 HDPE 切片的相应温度分别上升了约 12 ℃、10 ℃和 8 ℃，说明纳米粉体的添加，改善了 HDPE 的热稳定性能。

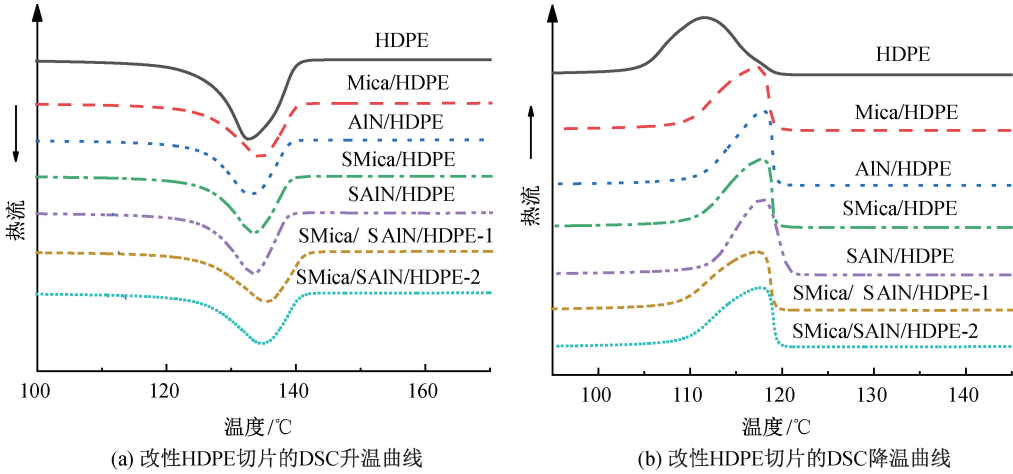


图 5 改性 HDPE 切片的 DSC 曲线

表 3 改性 HDPE 切片的 DSC 数据

样品编号	结晶峰温度 $T_{mc}/^{\circ}\text{C}$	熔融焓 $\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	熔点 $T_m/^{\circ}\text{C}$	结晶度 $X_c/\%$
HDPE	112	188.6	133	64.5
Mica/HDPE	117	220.6	135	77.0
AlN/HDPE	118	219.3	133	76.6
SMica/HDPE	118	226.1	134	78.9
SAIN/HDPE	119	225.4	134	78.7
SMica/SAIN/HDPE-1	117	219.1	136	76.5
SMica/SAIN/HDPE-2	118	221.8	135	79.1

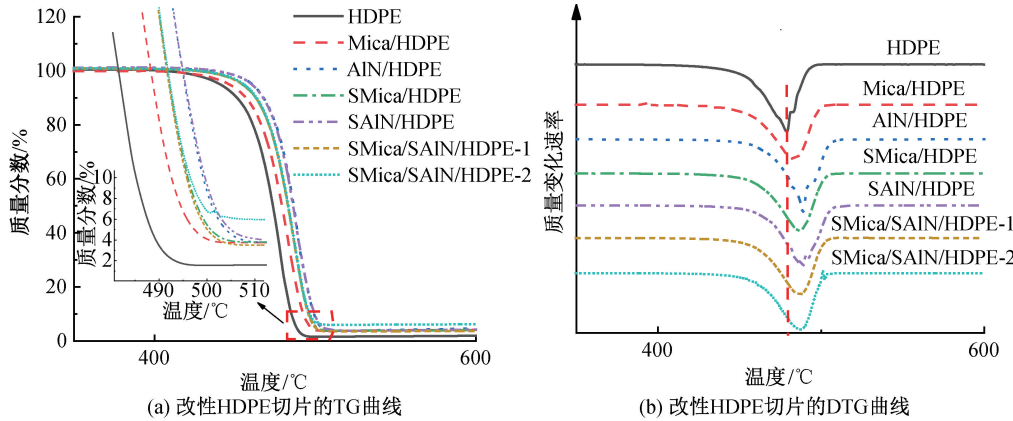


图 6 改性 HDPE 切片的热失重曲线

表 4 改性 HDPE 切片的 TG 数据

样品编号	失重 1.0%时的温度/ $^{\circ}\text{C}$	失重 5.0%时的温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大失重速率时的温度/ $^{\circ}\text{C}$
HDPE	431	459	479
Mica/HDPE	444	467	483
AlN/HDPE	458	485	488
SMica/HDPE	442	468	486
SAIN/HDPE	451	481	488
SMica/SAIN/HDPE-1	442	468	486
SMica/SAIN/HDPE-2	444	469	487

2.2.4 结晶形态分析

图 7 为 HDPE、Mica/HDPE、AlN/HDPE 和 SMica/SAlN/HDPE-1 切片在 128 ℃等温结晶的偏光显微镜图像。从图 7(a)中可以看出,纯 HDPE 呈现典型的球晶结构,球晶颗粒大、结构完整,边界清晰,在偏光显微镜下呈现明显的十字。由图 7(b)—(d)可以观察到改性 HDPE 切片中球晶的尺寸减

小,球晶之间的界面变得模糊,十字消光现象减弱,无法观察到完整的球晶。这是因为随着纳米粉体的添加,HDPE 中异相晶核的数量增加,晶核数量的增加使晶体在生长过程中相互接触、挤压,形成更多的破碎晶<sup>[15]</sup>。因此,随着纳米粉体的添加,HDPE 晶粒的数量增加,球晶的尺寸减小。

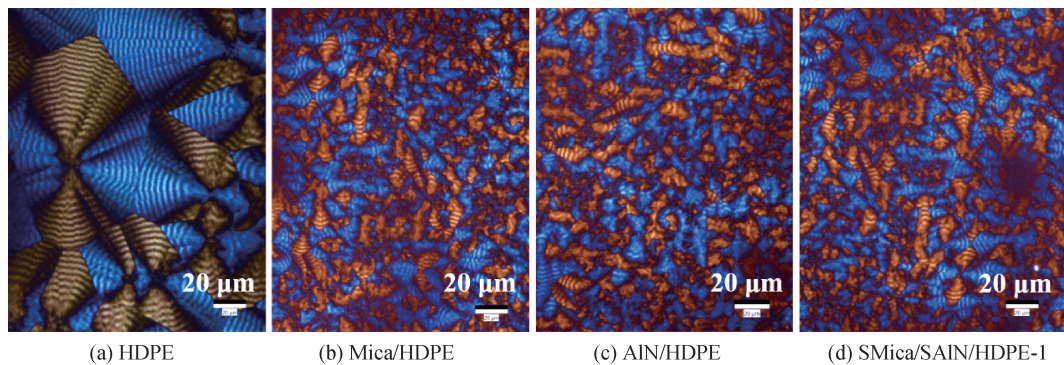


图 7 改性 HDPE 切片 128 ℃等温结晶的偏光显微镜图片

2.2.5 导热性能分析

表 5 为改性 HDPE 切片的导热系数测试结果。由表 5 可知,改性 HDPE 切片的导热系数相较于纯 HDPE 均有明显的提升。纯 HDPE 的导热系数为 0.290 W/(m·K),添加未处理的单一粉体后,Mica/HDPE、AlN/HDPE 切片的导热系数提高至 0.358、0.405 W/(m·K)。单一粉体经 A171 表面处理后,SMica/HDPE、SAlN/HDPE 切片的导热系数略有增加,这是因为表面处理后 SMica、SAlN 粉体与 HDPE 的相容性改善,传热时界面的声子散射效应得以抑制<sup>[16-17]</sup>。

将 SMica/HDPE、SAlN/HDPE 切片的导热系数以 3:1 的比例计算,可得出复配粉体制备的切片的理论导热系数为 0.407 W/(m·K),而 SMica:SAlN 以质量比 3:1 的比例添加制备的 SMica/SAlN/HDPE-1 切片的导热系数为 0.424 W/(m·K),明显高于其理论导热系数。这是因为在复配粉体中,SMica、SAlN 粉体的平均粒径分别为 380、230 nm,SAlN 粉体的平均粒径要小于 SMica 粉体,经熔融共混,SAlN 粉体有较大几率分布在 SMica 粉体之间,两种粉体在 HDPE 中产生协同效应,形成导热通路,导热通路的热阻远低于 HDPE 基体的热阻,有利于热量的传导,有效提高了 HDPE 的导热系数<sup>[18]</sup>。当添加的复配粉体的质量分数从 2.0% 增加到 4.0% 时,SMica/SAlN/HDPE-2 切片的导热系数提高至 0.473 W/(m·K)。这是因为复配粉体的导热系数远大于 HDPE,随着复配粉体含量的

增加,粉体在 HDPE 基体中形成的导热通路更加完善,因此 HDPE 的导热系数得到进一步提高。

表 5 改性 HDPE 切片的导热系数

试样名称/ 编号	测试 温度/℃	导热系数/ (W·(m·K) <sup>-1</sup> )	增幅/%
HDPE	25.0	0.290	—
Mica/HDPE	25.0	0.358	23.5
AlN/HDPE	25.0	0.405	39.6
SMica/HDPE	25.0	0.396	36.6
SAlN/HDPE	25.0	0.443	52.7
SMica/SAlN/HDPE-1	25.0	0.424	46.3
SMica/SAlN/HDPE-2	25.0	0.473	62.9

3 结 论

本文采用 A171 对 Mica、AlN 粉体进行表面处理,并将表面处理后的 SMica、SAlN 粉体与 HDPE 熔融共混制备改性 HDPE 切片,对 SMica、SAlN 粉体和改性 HDPE 切片的性能进行表征,得出以下结论:

a)经 A171 表面处理后,Mica 粉体的平均粒径由 460 nm 变为 380 nm,AlN 粉体的平均粒径由 280 nm 变为 230 nm,纳米粉体的平均粒径减小,粒径分布变窄,团聚现象有所改善。

b)与纯 HDPE 相比,添加了纳米粉体的改性 HDPE 切片的热稳定性提高,结晶度由改性前的 64.5%提升至改性后的 76.5%~79.1%,球晶尺寸减小。

c)与纯 HDPE 的相比,Mica/HDPE、AlN/



HDPE 切片的导热系数增大; Mica、AlN 粉体经 A171 表面处理后, SMica/HDPE、SAlN/HDPE 切片的导热系数进一步提高; 经 A171 表面处理的复配粉体制备的 SMica/SAlN/HDPE-1 切片, 导热系数提高至  $0.424 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

### 参考文献:

- [1] 李雪梅, 薛孝川, 罗丽珊. 功能性纤维材料研究进展[J]. 化纤与纺织技术, 2015, 44(4): 27-33.
- [2] 周兆懿, 张小琪. 凉感纤维开发及检测方法的研究进展[J]. 合成纤维, 2021, 50(6): 45-48.
- [3] Chen H, Ginzburg V V, Yang J, et al. Thermal conductivity of polymer-based composites: fundamentals and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2016, 59: 41-85.
- [4] 谢婷, 钱娟, 张佩华. 凉感聚乙烯纤维在凉爽功能纺织品中的应用与展望[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(6): 1-7.
- [5] 李顺希, 许志强, 詹莹韬, 等. 高密度聚乙烯/聚酰胺 6 复合纤维的制备及性能[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(1): 42-45, 49.
- [6] 魏洋. 新型降温散热纤维: 云母冰凉纤维[J]. 聚酯工业, 2011, 24(6): 9-11.
- [7] Gao T T, Yang Z, Chen C J, et al. Three-Dimensional printed thermal regulation textiles [J]. ACS Nano, 2017, 11(11): 11513-11520.
- [8] 余涵, 张辉. 玉石纤维热湿舒适性能研究[J]. 纺织科技进展, 2012, (1): 51-53.
- [9] 高中飞, 王明贺, 陈南飞, 等. 硅烷偶联剂 A171 湿法改性白炭黑及其应用[J]. 现代化工, 2018, 38(2): 79-82, 84.
- [10] 宋显志, 朱志平, 周攀, 等. 聚丙烯酸对  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的分散特性及其机理研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 479-485.
- [11] Thielbeer F, Donaldson K, Bradley M. Zeta potential mediated reaction monitoring on nano and microparticles [J]. Bioconjugate Chemistry, 2011, 22(2): 144-150.
- [12] Quiles-Díaz S, Martínez-Rubí, Guan J W, et al. Enhanced thermal conductivity in polymer nanocomposites via covalent functionalization of boron nitride nanotubes with short polyethylene chains for Heat-Transfer applications [J]. ACS Applied Nano Materials, 2019, 2(1): 440-451.
- [13] Huang X Y, Iizuka T, Jiang P K, et al. Role of interface on the thermal conductivity of highly filled dielectric Epoxy/AlN composites[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, 116(25): 13629-13639.
- [14] 王文博, 王亚桥, 余克松, 等. 纳米二氧化硅/POE 协同增韧聚对苯二甲酸乙二醇酯及其发泡行为研究[J]. 中国塑料, 2018, 32(5): 28-33.
- [15] Menezes B, Campos T, Montanheiro T, et al. Non-isothermal crystallization kinetic of polyethylene/carbon nanotubes nanocomposites using an isoconversional method[J]. Journal of Composites Science, 2019, 3(1): 21-39.
- [16] Gojny F H, Wichmann M H G, Fiedler B, et al. Evaluation and identification of electrical and thermal conduction mechanisms in carbon nanotube/epoxy composites[J]. Polymer, 2006, 47(6): 2036-2045.
- [17] Hu M, Koblinski P, Wang J S, et al. Interfacial thermal conductance between silicon and a vertical carbon nanotube[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(8): 169-172.
- [18] 周文英. 高导热绝缘高分子复合材料研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 97-109.

(责任编辑: 张会巍)