

# 棒状卷片式 PA66/PBAT 复合材料的制备及性能研究

纪 泼<sup>1,2</sup>, 沙士璞<sup>2</sup>, 林永兴<sup>2\*</sup>, 李向阳<sup>2</sup>, 郑 康<sup>2</sup>

(1. 安徽大学, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院固体物理研究所  
中国科学院光伏与节能材料重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)作为一种石油基柔性生物可降解聚合物,因其良好的延展性和环境友好特性获得广泛应用。但是,PBAT存在强度差、模量低、耐热性差、结晶速率慢等缺陷。文章将新型的微纳米级棒状卷片式聚酰胺66(PA66)以极少的添加量与PBAT溶液进行共混,以改善PBAT的各种性能。结果表明:棒状卷片式PA66与PBAT的共混质量比为1:1 000时,复合材料表现出最优性能,断裂伸长率仅降低5.79%,屈服强度增强29.84%,杨氏模量增加110.56%,弹性模量是PBAT材料的2.6倍。因此,棒状卷片式PA66粉末材料在共混体系中能够起到高效成核剂和增强剂的作用。研究为可降解塑料PBAT的高效改性增强提供了新的技术路径。

**关键词:** 聚酰胺66; 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯; 共混材料; 可降解塑料

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0001-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.001

## Preparation and Properties Study of Rod-like Rolled Sheet PA66/PBAT Composites

Ji Po<sup>1,2</sup>, Sha Shipu<sup>2</sup>, Lin Yongxing<sup>2\*</sup>, Li Xiangyang<sup>2</sup>, Zheng Kang<sup>2</sup>

(1. Anhui University, Hefei 230031, China; 2. Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Photovoltaic and Energy-Saving Materials, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) is a petroleum-based, flexible, biodegradable polymer that is widely used because of its good ductility and environmentally friendly properties. However, PBAT suffers from defects such as low strength, low modulus, poor heat resistance and slow crystallisation rate. The new type of micronano-sized rod-like rolled sheet polyamide 66 (PA66) was blended with PBAT solution in a very small amount to improve the various properties of PBAT. The results showed that the composites exhibited optimum performance when the blended mass ratio of rod-like rolled sheet PA66 to PBAT was 1 : 1 000, in which the elongation at break was reduced by only 5.79%, the yield strength was increased by 29.84%, the Young's modulus was increased by 110.56%, and the elastic modulus was 2.6 times higher than that of the PBAT material. Therefore, the rod-like rolled sheet PA66 powder material can play the role of an efficient nucleating and reinforcing agent in the mixing system. The study provides a new technical way for the efficient modification and improvement of PBAT degradable plastic.

**Keywords:** PA66; PBAT; Blend material; Degradable plastics

随着全球绿色发展意识的增强,传统塑料难以降解特性带来的环境污染问题日益突出,可降解塑料的研发与应用逐渐成为科学研究的热点。全球生物可降解塑料的用量和产能逐年提高<sup>[1-2]</sup>。聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)作为一种石油基柔性生物可降解聚合物,因

其良好的延展性和环境友好性已被广泛应用于农业地膜和食品包装等领域<sup>[3]</sup>。然而,PBAT也存在强度差、模量低、耐热性差、结晶速率慢等缺陷<sup>[4-6]</sup>。因此,在不影响降解性能的前提下,以刚性聚合物材料作为添加剂<sup>[7]</sup>,通过共混工艺调节添加剂与PBAT的质量比来制备不同物性的复合材

收稿日期 Submitted date 2024-12-16; 修回日期 Revised date 2025-01-14; 录用日期 Accepted date 2025-02-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(22175183)

\*联系人, yxlin@issp.ac.cn

引用本文: 纪泼,沙士璞,林永兴,等.棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的制备及性能研究[J].塑料科技,2026,54(1):1-6.

Citation: Ji P, Sha S P, Lin Y X, et al. Preparation and properties study of rod-like rolled sheet PA66/PBAT composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 1-6.

料,以满足更高层次的应用需求<sup>[8-9]</sup>。

在PBAT中添加异质共混物(包括纤维<sup>[10]</sup>、无机填料<sup>[11]</sup>、纳米有机填料<sup>[12]</sup>等)能够制备兼具两者优点的复合材料,通过一定的制备工艺可得到具有更好的力学性能和结晶性能的PBAT复合材料,而添加剂本身的力学性能、结晶性能以及结构形貌对最终产品的各项性能有着至关重要的影响<sup>[13]</sup>。YANG等<sup>[14]</sup>为改善PBAT的热学性能和结晶特性,采用熔融共混法制备聚己内酯(PCL)/PBAT形状记忆混合物,当PBAT的质量分数为40%时,材料的整体性能达到优良水平且成本较低,有利于实际生产应用。此外,添加聚合物共混改性PBAT的方法还被广泛用于增强PBAT的力学性能。YE等<sup>[15]</sup>结合热加工和超临界二氧化碳发泡技术向PBAT体系引入聚乙烯醇(PVA),研究PVA含量对共混物的相形貌和流变行为、泡孔结构和力学性能的影响。结果表明,制得的复合材料表现出较高的比抗压强度和重量损失率,但其体积收缩率仅为0.7%,这为扩大PBAT应用和解决一次性泡沫塑料污染问题提供了新思路。为改善PBAT的力学性能,罗开举等<sup>[16]</sup>通过添加质量分数为5%~25%的聚乳酸(PLA)、聚乙交酯(PGA)和与PBAT共混制备PLA/PBAT和PGA/PBAT复合材料,PBAT的模量和强度均得到有效提升,其中PLA与PBAT的复合已成为一种常用的增强手段<sup>[17]</sup>,但PLA的添加量较多。目前,PBAT改性材料的应用依然受到其成本高、强度低和加工难度大的限制。

聚酰胺(PA)是一类极具应用前景的高分子材料,其分子结构中的酰胺键和氢键使其具备优良的机械强度、热稳定性、韧性和亲水性等特性,使PA在工程塑料和聚合物填料领域得到广泛应用<sup>[18-19]</sup>。其中,聚酰胺66(PA66)作为一种半结晶型聚合物,具有多种晶型,可以形成不同晶体结构、结晶度以及晶粒尺寸<sup>[20]</sup>,具有结晶速率快、强度较高、刚性好、抗冲击性能优异等特点,被广泛应用于工业、服装和装饰等领域<sup>[21-22]</sup>。

本文利用溶液孵育法制备具有微纳米级结构的棒状卷片式PA66粉末。其独特的微纳米级的小尺寸、长径比结构,有利于改善PBAT的结晶性能,进而提高复合材料的力学性能。将该粉末作为异质共混物与PBAT基体共混,利用两种半结晶聚合物间的协同作用,以三氯甲烷为良溶剂,乙醇为不良溶剂,采用溶液涂布法制备棒状卷片式PA66/PBAT复合材料,通过调控共混比例制备性能更优的可降解复合材料,同时为高强、高韧PBAT的研究提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PBAT,粒度3 mm,  $M_w$  约为80 000,上海麦克林生化科技股份有限公司;聚酰胺66(PA66),  $M_w \geq 226.14$  g/mol,美国Sigma-Aldrich公司;乙二醇(分析纯,质量分数为98.0%)、乙醇(技术级,质量分数为99.5%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;三氯甲烷,分析纯,质量分数为 $\geq 99.0\%$ ,国药

试剂网。

### 1.2 仪器与设备

涂布机,MS-ZN320A,厦门茂森自动化设备有限公司;离子溅射镀膜机,K550X,英国EMITECH公司;扫描电子显微镜(SEM),EVO10,德国ZEISS公司;接触角测试仪,CA-100C&D,上海盛诺精密仪器有限公司;X射线衍射仪(XRD),Smartlab SE 9 kW,日本Rigaku公司;万能拉力试验机,AGS-X,日本岛津制作所;差示扫描量热仪(DSC),DSC-214,德国耐驰公司;傅里叶红外变换光谱仪(FTIR),Nicolet is20,美国赛默飞公司。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 棒状卷片式PA66粉末的制备

首先,将PA66颗粒于60 °C下真空干燥24 h。称取一定质量的干燥原料加入乙二醇中(PA66的质量分数为0.2%),之后放入油浴锅在190 °C下加热40 min直至固体完全溶解,制得PA66/EG溶液。调节温度至140 °C,在持续搅拌的状态下保温3 h,保温结束后,将溶液静置24 h冷却至室温。对冷却好的溶液进行固液分离处理,抽滤掉上清液,用去离子水和无水乙醇反复洗涤。将分离出的固体在30 °C的烘箱中干燥6 h后,制得具有微纳米级结构的棒状卷片式PA66粉末样品。

#### 1.3.2 棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的制备

表1为PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的配方。首先,将PBAT颗粒于30 °C下真空干燥24 h。称取一定质量的干燥原料加入三氯甲烷中(PBAT的质量分数为20%),密封后常温下搅拌24 h直至固体完全溶解,即制得PBAT/三氯甲烷溶液。称取一定质量的制备好的棒状卷片式PA66粉末分散于少量的乙醇中( $m_{\text{乙醇}}:m_{\text{三氯甲烷}}=9:1$ ),超声处理使其分散均匀,之后与配置好的PBAT/三氯甲烷溶液混合,室温下继续搅拌3 h,充分混合后,再超声5 min静置1 h消泡。使用涂布机,室温下以30 cm/min的速度在玻璃板上涂布制膜。将湿膜样品置于常温的通风橱中24 h,使溶剂完全挥发,制得棒状卷片式PA66/PBAT复合材料。

表1 PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的配方

Tab.1 Formula of PBAT and rod-like rolled sheet PA66/PBAT composites

样品编号	$m_{\text{棒状卷片式PA66粉末}}/\text{g}$	$m_{\text{PBAT}}/\text{g}$	$m_{\text{棒状卷片式PA66粉末}}:m_{\text{PBAT}}$
1	0	10	0
2	0.005	10	1:2 000
3	0.010	10	1:1 000
4	0.050	10	1:200
5	0.100	10	1:100

为提供对比样,选用原料粉末PA66,采用同样的工艺及配比制备原料粉末PA66/PBAT共混材料。

## 1.4 性能测试与表征

**SEM测试:**取少量棒状卷片式PA66粉末分散于无水乙醇中,使用硅片做衬底制备扫描样品,对其进行喷金处理后,采用扫描电子显微镜观察其微观形貌。使用液氮对棒状卷片式PA66/PBAT复合材料脆断后进行喷金处理,采用扫描电子显微镜观察其断面微观形貌。

**接触角测试:**将棒状卷片式PA66/PBAT复合材料提前制成细长样条,固定在载物台上,使用微量针管在其平整部位滴一滴蒸馏水,10 s后,利用接触角测试仪拍摄照片并计算接触角。

**FTIR测试:**采用傅里叶红外变换光谱仪进行测试,扫描范围为 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

**DSC测试:**在 $\text{N}_2$ 气氛下进行,以 $50\text{ mL/min}$ 的速率吹扫氮气。取 $10\sim 15\text{ mg}$ 的小样品片放入差示扫描量热仪,进行热分析。第一次加热过程:以 $10\text{ }^\circ\text{C/min}$ 的升温速率将样品从 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $180\text{ }^\circ\text{C}$ ,然后在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 保持5 min,以消除热历史。冷却降温过程:将样品以 $10\text{ }^\circ\text{C/min}$ 的速率从 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 冷却至 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 保持5 min。第二次加热过程:以 $10\text{ }^\circ\text{C/min}$ 的升温速率将样品从 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 。加热温度需高于PBAT熔融温度,低于PA66熔融温度,以保证棒状卷片式PA66稳定存在。另外,还设计第二组测试程序进行对比,在第一组测试程序的基础上,设置程序升温至 $300\text{ }^\circ\text{C}$ ,使棒状卷片式PA66熔融,破坏其结构。

**力学性能测试:**根据GB/T 1040.3—2006,采用万能拉力试验机评估复合材料的力学性能。拉伸测试速度为 $50\text{ mm/min}$ ,测试前将复合薄膜裁切成长度为 $30\text{ mm}$ 、宽度为 $5\text{ mm}$ 的哑铃形样条。

**XRD测试:**采用X射线衍射仪进行测试,扫描范围为 $5^\circ\sim 35^\circ$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PA66的微观形态结构

图1为棒状卷片式PA66粉末和原料粉末PA66的SEM照片。从图1可以看出,棒状卷片式PA66粉末的微观结构为微纳米级片层且卷曲成宽约 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、长约 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的棒状结构;原料PA66粉末的微观结构形貌为堆积的块体,纵横尺寸均在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上,整体粗大,属于宏观体相材料,不适合作为改性剂。因此,文中主要针对棒状卷片式PA66制备复合材料并对其表征测试结果进行讨论。

图2为PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的断面微观形貌SEM照片。从图2可以看出,纯PBAT试样断面平整;棒状卷片式PA66/PBAT复合材料中,棒状卷片式PA66呈岛状均匀分布于PBAT基体中。

### 2.2 棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的亲水性能

PBAT虽属于可完全降解塑料,但仍存在生物降解速率较慢的缺点<sup>[23]</sup>,可降解塑料的降解速率与其亲水性能密切相关<sup>[24]</sup>。图3为PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的水接触角。从图3可以看出,随着棒状卷片式PA66粉

末添加量的增加,复合材料表面与水的平均接触角减小,相应复合材料的亲水性能增加。这是由于PA66是亲水材料,具有亲水的酰胺基团,当PA66添加量增加时,复合材料表面的酰胺基含量增加,从而提高了材料的亲水性能,有利于水、微生物等附着在材料表面,促进材料的降解<sup>[25]</sup>。

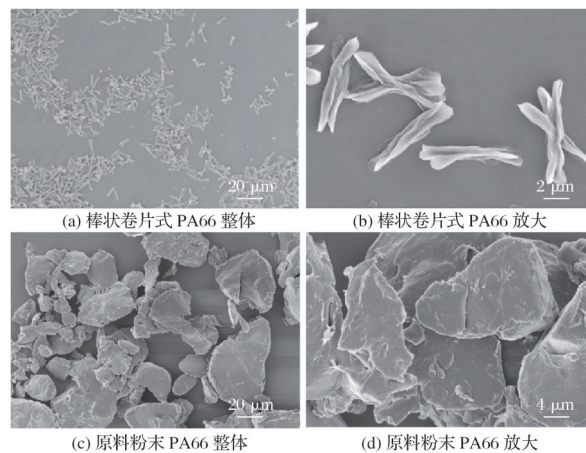


图1 棒状卷片式PA66粉末和原料粉末PA66的SEM照片  
Fig.1 SEM images of rod-like rolled sheet PA66 powder and raw material powder PA66

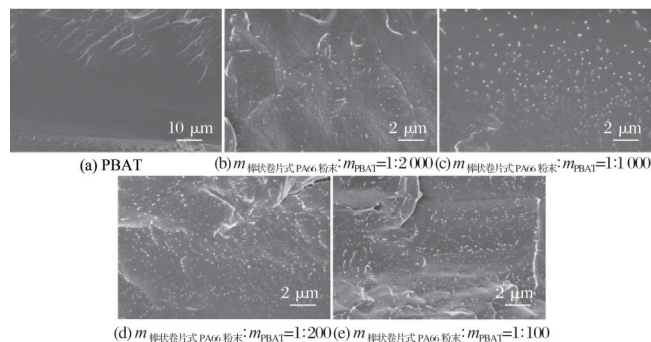


图2 PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的断面微观形貌SEM照片

Fig.2 SEM images of fracture morphology of PBAT and rod-like rolled sheet PA66/PBAT composites

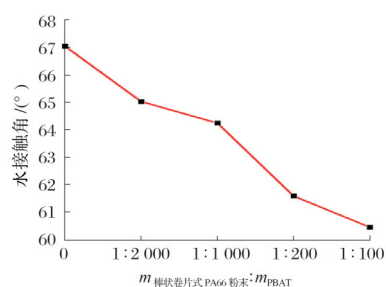


图3 PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的水接触角  
Fig.3 Water contact angle of PBAT and rod-like rolled sheet PA66/PBAT composites

### 2.3 棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的FTIR表征

图4为PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的FTIR谱图。从图4可以看出,复合材料的FTIR特征峰波数基本一致,随着棒状卷片式PA66粉末添加量的增加,仅

在  $3\ 300\ \text{cm}^{-1}$  处出现响应峰且峰强度逐渐升高。这归因于 PA66 添加量的增加导致酰胺基团含量增加,从而吸附更多的游离水。这一结果也论证了复合材料与水的接触角随棒状卷片式 PA66 粉末添加量的增加而减小的结论。

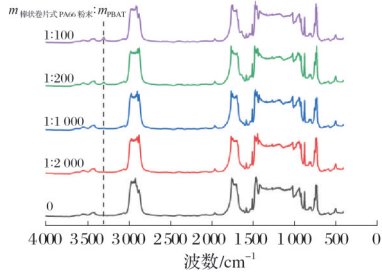


图4 PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的FTIR谱图

Fig.4 FTIR spectra of PBAT and rod-like rolled sheet

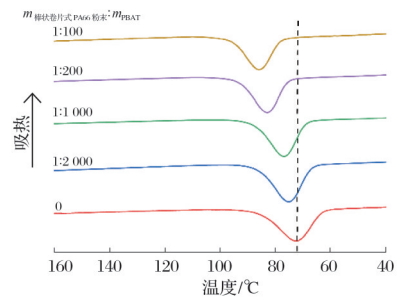
PA66/PBAT composites

## 2.4 棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的结晶熔融性能

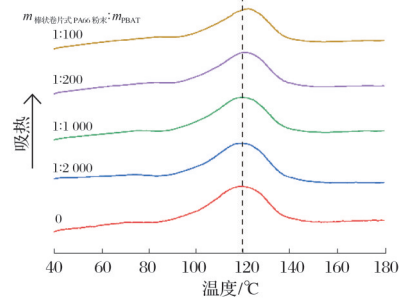
图5为PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的二次升温DSC曲线,表2为PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的结晶性能(程序升温至 $180\ ^\circ\text{C}$ )。

从图5a和表2可以看出,程序升温至 $180\ ^\circ\text{C}$ ,在保证PBAT熔融且内部棒状卷片式PA66结晶填充材料结构不变的情况下,材料在降温过程中有且仅有一个PBAT的结晶放热峰。同时可以观察到,纯PBAT的结晶温度为 $72.8\ ^\circ\text{C}$ ,复合材料中PBAT基体的冷结晶峰向高温方向移动;当 $m_{\text{棒状卷片式PA66}}:m_{\text{PBAT}}$ 为1:100时,复合材料结晶温度升高到 $85.8\ ^\circ\text{C}$ ,升高 $13\ ^\circ\text{C}$ 。起始结晶温度也随之增大,由 $86\ ^\circ\text{C}$ 增加到 $96\ ^\circ\text{C}$ ,增加 $10\ ^\circ\text{C}$ 。由此看出,棒状卷片式PA66粉末能够提高共混材料中PBAT的结晶能力。另外,共混材料相应半结晶峰宽由 $11.4\ ^\circ\text{C}$ 变窄至 $8.85\ ^\circ\text{C}$ ,减小 $2.55\ ^\circ\text{C}$ 。由此反映出材料中PBAT的结晶速率有增加的趋势。

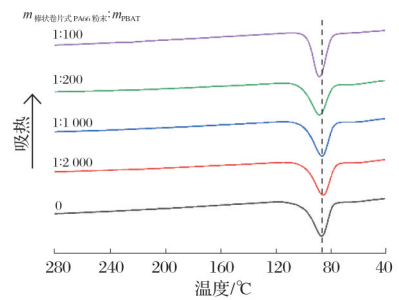
为探究棒状卷片式PA66形貌结构对材料结晶熔融性能的影响,DSC升温至 $300\ ^\circ\text{C}$ 以破坏其结构,结果如图5d、图5c所示。结合图1中棒状卷片式PA66结晶的SEM图片,分析复合材料熔融结晶性能变化的原因可能有两方面。一方面,棒状卷片式PA66结晶的微纳米级的小尺寸特性,使其能够在共混体系中作为PBAT的成核剂,从而提高PBAT的结晶能力。另一方面,棒状卷片式PA66结晶独特的卷曲薄片层结构具有较大的比表面积和体系分散优势,能够保证在共混体系中的有效分散,划分出更多的PBAT结晶域,进而影响PBAT的结晶特性。此外,棒状结构较大的长径比能够诱导共混体系中PBAT分子链沿长径比方向舒展,向晶核扩散进行分子链折叠、排列形成结晶,进而提高结晶能力和结晶速率。由图5b和表2可以看出,棒状卷片式PA66结晶的加入对基体PBAT的熔融峰温度、熔融起始温度、熔融焓等特性的影响不明显,对PBAT的熔融行为影响不大。



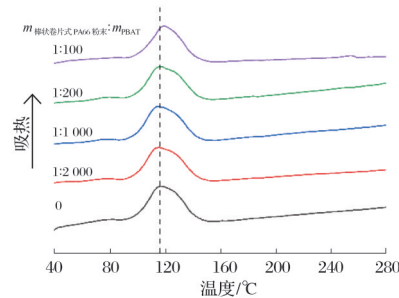
(a) 结晶曲线(升温至 $180\ ^\circ\text{C}$ )



(b) 熔融曲线(升温至 $180\ ^\circ\text{C}$ )



(c) 结晶曲线(升温至 $300\ ^\circ\text{C}$ )



(d) 熔融曲线(升温至 $300\ ^\circ\text{C}$ )

图5 PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的二次升温DSC曲线

Fig.5 Secondary heating DSC curves of PBAT and rod-like rolled sheet PA66/PBAT composites

## 2.5 棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的力学性能

图6为PBAT和PA66/PBAT复合材料的应力-应变曲线,表3为PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的力学性能。从图6a和表3可以看出,随着棒状卷片式PA66粉末添加量的增加,复合材料的断裂伸长率略有降低,其他力学性能呈先增后减的趋势。其中棒状卷片式PA66和PBAT质量比为1:1000的试样表现出最优的综合力学性能,具有最高的屈服强度、杨氏模量和弹性模量,分别为 $5.57$ 、 $47.520$ 、 $231.62\ \text{MPa}$ ,相较纯PBAT试样的对应参数增加 $1.28$ 、 $24.95$ 、 $140.85\ \text{MPa}$ ,断裂伸长率为 $1\ 132.58\%$ ,相较

纯PBAT试样仅降低5.79%,屈服强度增强29.84%,杨氏模量增强110.56%,弹性模量是纯PBAT试样的2.6倍。

表2 PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的结晶性能(程序升温至180℃)

Tab.2 Crystalline properties of PBAT and rod-like rolled sheet PA66/PBAT composites (Programmed temperature increase to 180℃)

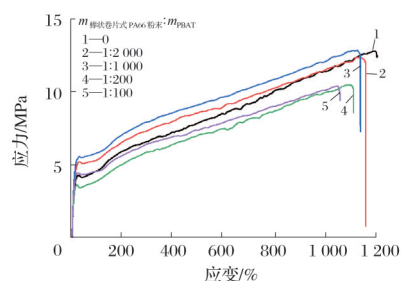
样品编号	结晶峰温度/℃	起始结晶温度/℃	半结晶峰宽/℃	结晶焓/(J·g <sup>-1</sup> )	熔融峰温度/℃	熔融焓/(J·g <sup>-1</sup> )
1	72.8	86.0	12.35	14.78	119.3	21.17
2	75.3	86.6	9.70	14.71	119.4	20.90
3	77.0	88.0	9.40	13.89	119.5	20.70
4	81.3	93.4	8.85	12.62	120.7	20.54
5	85.8	96.0	8.85	11.95	123.0	20.06

使用原料粉末PA66与PBAT共混制备原料粉末PA66/PBAT复合材料作为参照对比,并对其力学性能进行测试。从图6b可以看出,使用原料粉末制备的复合材料,其断裂伸长率均在140%以下,屈服强度均在5MPa以下,力学性能甚至远远低于纯PBAT材料,验证了前面的原料粉末形貌表征结果。同时,严重降低的力学性能使其不具备进一步讨论的价值,故不再讨论该复合材料的其他性能。

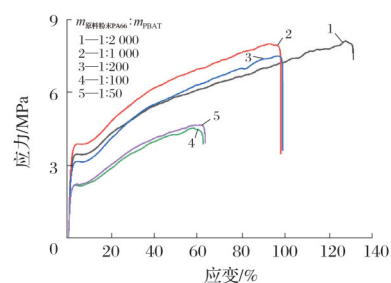
够提高共混体系中PBAT的结晶性能,进而增强PBAT的强度;另一方面由于PA66材料具有优异的力学强度,少量棒状卷片式PA66能够均匀地分散于PBAT基体中,使复合材料的力学性能得到提升。当粉末添加量逐渐增多时,各力学参数均有不同程度波动,且出现一定程度降低的现象,这主要是由于较多的填充材料会影响PBAT分子链的移动和分子取向,PBAT分子链在共混体系中迁移困难,从而导致断裂伸长率的整体降低。另外,PBAT和PA66不相容,两种材料之间存在不可避免的界面效应<sup>[26]</sup>,随着棒状卷片式PA66添加量的增加,两种材料的表面极性相斥作用增强,共混体系的材料相容性进一步降低,两种材料的界面效应达到一定阈值时,复合材料的力学性能急速降低,最终导致材料强度和模量的整体降低。

## 2.6 棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的XRD分析

图7为PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的XRD谱图。PA66和PBAT是典型的半结晶聚合物,PA66的衍射峰主要出现在20.4°和24.7°附近,PBAT衍射峰的主要出现在16.0°、17.3°、20.1°、23.0°和24.5°附近。从图7可以看出,不同复合材料均在16.0°、17.3°、20.1°和23.0°附近出现衍射峰,在24.5°处存在非常平缓的衍射峰。由于PA66总的添加量极少(质量比≤1:100),未见其明显的衍射峰。即使如此,随着棒状卷片式PA66添加量的增加,复合材料的衍射峰出现先增强后减弱的趋势,说明其对PBAT的结晶过程影响较为显著,使PBAT的结晶度先提高后降低,这个特征还可与前面的DSC和应力应变测试结果一起互相佐证。



(a) 棒状卷片式PA66/PBAT复合材料



(b) 原料粉末PA66/PBAT复合材料

图6 PBAT和PA66/PBAT复合材料的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of PBAT and PA66/PBAT composites

表3 PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of PBAT and rod-like rolled sheet

PA66/PBAT composites

样品编号	屈服强度/ MPa	杨氏模量/ MPa	弹性模量/ MPa	断裂伸长率/ %
1	4.29	22.568	90.77	1 202.16
2	5.22	36.867	183.77	1 158.01
3	5.57	47.520	231.62	1 132.58
4	4.04	36.437	152.77	1 104.63
5	4.46	37.406	220.18	1 051.02

棒状卷片式PA66/PBAT复合材料力学性能的改善,一方面是由于具有微纳米级棒状卷片结构的PA66粉末就能

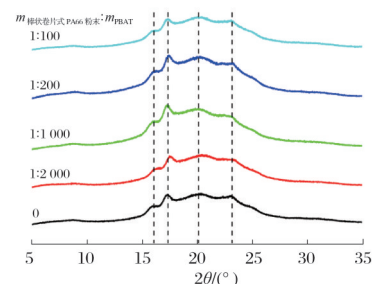


图7 PBAT和棒状卷片式PA66/PBAT复合材料的XRD谱图

Fig.7 XRD patterns of PBAT and rod-like rolled sheet PA66/PBAT composites

### 3 结论

将棒状卷片式PA66粉末材料与PBAT共混,在棒状卷片式PA66粉末材料添加量极少的情况下( $m_{\text{棒状卷片式PA66}} : m_{\text{PBAT}}$ 为1:1 000),复合材料性能的力学性能和体系中PBAT的结晶性能均得到改善。棒状卷片PA66能够诱导PBAT分子链的取向及排列,进而提高复合材料中PBAT基体的结晶性能,并加快结晶速率,有助于提升材料的力学性能,制备的棒状卷片式PA66/PBAT复合材料与纯PBAT基体样品相比,断裂伸长率仅下降5.79%,屈服强度增强29.84%,杨氏模量增加110.56%,弹性模量是纯PBAT材料的2.6倍。本研究为实现可降解塑料PBAT的高效改性增强提供了新的技术路径。

#### 参考文献

- [1] PLASTICS EUROPE. Plastics-the fast Facts 2024[R]. Belgium: Plastics Europe, 2024.
- [2] EUROPEAN BIOPLASTICS. Bioplastics market development update 2024[R]. Germany: EUBP, 2024.
- [3] ROY S, GHOSH T, ZHANG W L, et al. Recent progress in PBAT-based films and food packaging applications: A mini-review[J]. Food Chemistry, 2024, 437: 137822.
- [4] SANTOS T T, ALMEIDA G T, MORAIS S D D, et al. Effect of filler type on properties of PBAT/organoclay nanocomposites[J]. Polymer Bulletin, 2020, 77(2): 901-917.
- [5] KILIC N T, CAN B N, KODAL M, et al. The potential use of epoxy-POSS as a reactive hybrid compatibilizers for PLA/PBAT blends: "Effect of PBAT molecular weight and POSS type"[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(2): 398-413.
- [6] LI H H, DING J P, AYTIBEKE Y, et al. Effect of titanate coupling agent on antioxidant property and UV blocking property of PBAT/lignin composite films[J]. Polymer Testing, 2024, 140: 108613.
- [7] MENDOZA-DUARTE M E, ESTRADA-MORENO I A, GARCÍA-CASILLAS P E, et al. Stiff-elongated balance of PLA-based polymer blends[J]. Polymers, 2021, 13(24): 4279.
- [8] MING M H, ZHOU Y C, WANG L D, et al. Effect of polycarbodiimide on the structure and mechanical properties of PLA/PBAT blends[J]. Journal of Polymer Research, 2022, 29(9): 371.
- [9] HU L M, HAN Y Y, RONG C Y, et al. Interfacial engineering with rigid nanoplatelets in immiscible polymer blends: Interface strengthening and interfacial curvature controlling[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(8): 11016-11027.
- [10] FOURATI Y, TARRÉS Q, DELGADO-AGUILAR M, et al. Cellulose nanofibrils reinforced PBAT/TPS blends: Mechanical and rheological properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 267-275.
- [11] HELANTO K, TALJA R, ROJAS O J. Effects of talc, kaolin and calcium carbonate as fillers in biopolymer packaging materials[J]. Journal of Polymer Engineering, 2021, 41(9): 746-758.
- [12] PAL A K, WU F, MISRA M, et al. Reactive extrusion of sustainable PHBV/PBAT-based nanocomposite films with organically modified nanoclay for packaging applications: Compression moulding vs. cast film extrusion[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 198: 108141.
- [13] IVANCIC R J S, AUDUS D J, et al. Predicting compatibilized polymer blend toughness[J]. Science Advances, 2024, 10(25): 11.
- [14] YANG B X, XIA Y, ZHOU H M, et al. Thermal and crystalline properties of biodegradable PCL/PBAT shape memory blends[J]. Iranian Polymer Journal, 2023, 32(7): 791-800.
- [15] YE X, XU D W, WANG Q. Enhancing the antishrinkage and mechanical performances of the PBAT/PVA foam for environment-friendly packaging[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(44): 18997-19006.
- [16] 罗开举, 丁枫. PGA熔融改性PBAT共混物的制备与性能[J]. 塑料科技, 2024, 52(5): 107-111.
- [17] LUO K M, LIU J X, ABBAY K, et al. The relationships between the structure and properties of PA56 and PA66 and their fibers[J]. Polymers, 2023, 15(13): 2877.
- [18] ZHANG C H. Progress in semicrystalline heat-resistant polyamides[J]. e-Polymers, 2018, 18(5): 373-408.
- [19] 李德军, 杜悦, 周志峰, 等. 溴化丁基橡胶/聚酰胺热塑性硫化胶薄膜的制备与性能研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(2): 89-94.
- [20] SHI S H, WANG Y K, ZHANG Y J, et al. Plasticizer role of cellulose nanocrystals in the biodegradable polymer blend with ductile polymer as continuous phase[J]. Cellulose, 2023, 30(16): 10139-10156.
- [21] 王正宏, 张敏, 黄宁选, 等. 尼龙66改性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(1): 121-125.
- [22] CANDAU N, CHENAL J M, LAME O, et al. Enhanced ductility in high performance polyamides due to strain-induced phase transitions [J]. Polymer, 2022, 238: 124424.
- [23] CAMANI P H, SOUZA A G, BARBOSA R F S, et al. Comprehensive insight into surfactant modified-PBAT physico-chemical and biodegradability properties[J]. Chemosphere, 2021, 269: 128708.
- [24] NING Y, WANG W Y, ZHOU Y G, et al. Acceleration effects of residual monomers on the degradation of poly(glycolic acids) [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2021, 29(9): 3054-3067.
- [25] DALGAARD KJAER F, JOLY F X. Biodegradable waste does not always degrade faster than plastic[J]. Waste Management, 2025, 191: 117-122.
- [26] ZHANG W L, ZOU L Y. Molecular dynamics simulations of crystal nucleation near interfaces in incompatible polymer blends[J]. Polymers, 2021, 13(3): 347.