

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.07.021

成纤相组成对PBAT/PLA微纤复合材料形貌及性能的影响

孙静, 罗珊珊, 李剑, 黄安荣, 石敏, 李娟, 高成涛, 段丽

(贵州省材料产业技术研究院, 贵阳 550000)

摘要:通过在聚乳酸(PLA)中加入滑石粉及扩链剂(ADR-4468),然后利用双螺杆挤出制备了成纤相母粒,并采用自制的多级挤出拉伸装置制备了含有不同成纤相组成的聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)/PLA微纤复合材料。通过熔体流动速率(MFR)试验机、扫描电子显微镜、万能试验机及旋转流变仪对成纤相母粒的MFR及微纤复合材料的微观形貌、力学性能、流变性能进行了分析。结果表明,随着滑石粉及ADR-4468含量的增加,成纤相母粒的MFR逐渐减小,当ADR-4468质量分数为0.7%时,M6-0.7母粒的MFR为1.9 g/10 min。随着ADR-4468含量的增加,形成的PLA微纤直径增大、长度明显减小,当ADR-4468含量为0.7%时,只有少量的PLA形成短状微纤。PLA微纤含量为10%时,PLA-10试样的拉伸强度最大,为53.8 MPa,是PBAT的1.49倍,但断裂伸长率大幅下降。随着PLA微纤含量增加,微纤复合材料的拉伸弹性模量逐渐增大。所有含PLA微纤的试样,其储能模量(G')均随角频率(ω)的增大而增大。随着成纤相母粒中滑石粉含量的增加,试样的 G' 和复数黏度(η^*)均减小,所有成纤相母粒中含有ADR-4468的微纤复合材料,其 G' 及 η^* 均高于未含ADR-4468的试样。

关键词:聚乳酸;聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯;成纤相;微纤复合材料;流变性能

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)07-0148-07

Effect of fibrous phase composition on morphology and properties of PBAT/PLA microfibrillar composite

SUN Jing, LUO Shanshan, LI Jian, HUANG Anrong, SHI Min, LI Juan, GAO Chengtao, DUAN Li

(Guizhou Material Industrial Technology Institute, Guiyang 550000, China)

Abstract : The talc powder and chain extender (ADR-4468) was added to polylactic acid (PLA) and the fibrous phase masterbatch was prepared using a twin-screw extrusion, then the polybutylene adipate terephthalate (PBAT)/PLA microfibrillar composites with different fibrous phase were prepared using self-made multi-stage extrusion stretching device. The melt flow rate (MFR), microstructure, mechanical properties, and rheological properties of microfibrillar composites were analyzed using a melt flow rate testing machine, scanning electron microscope, universal testing machine, and rotary rheometer. The results show that the MFR of fibrous phase masterbatch gradually decreases with the increase of talc powder and chain extender contents, the MFR of M6-0.7 masterbatch is 1.9 g/10 min when the ADR-4468 content is 0.7%. With the increase of ADR-4468 contents, the diameter of PLA microfibrils increases and the length significantly decreases. When the ADR-4468 content is 0.7%, only a small amount of PLA form short PLA microfibrils. When the content of PLA microfiber is 10 %, the tensile strength of PLA-10 sample is the highest, which is 53.8 MPa, which is 1.49 times that of PBAT, but the elongation at break decreases significantly. The tensile modulus of microfibrillar composites gradually increase with the increasing content of PLA microfibrils. The storage modulus (G') of the samples contained PLA microfibrils increase with the increase of angular frequency (ω). As the content of talc powder increased, the G' and complex viscosity (η^*) of the samples decrease, all the microfibrillar composites of fibrous phase masterbatch contained ADR-4468 have higher G' and η^* than those without ADR-4468.

Keywords : polylactic acid ; polybutylene adipate terephthalate ; fibrous phase ; microfibrillar composite ; rheological property

基金项目: 国家自然科学基金项目(52063007),中央引导地方发展资金(黔科合中引地[2023]035),贵州省科技计划项目(黔科合服企[2023]001,黔科合支撑[2022]一般058,黔科合支撑[2023]一般195,黔科合支撑[2023]一般229,黔科合成果[2024]重大008,黔科合成果[2024]一般143,黔科合成果[2024]一般045)

通信作者: 段丽, 硕士, 工程师, 主要从事聚合物改性研究

收稿日期: 2024-04-19

引用格式: 孙静, 罗珊珊, 李剑, 等. 成纤相组成对PBAT/PLA微纤复合材料形貌及性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 148-154.

SUN Jing, LUO Shanshan, LI Jian, et al. Effect of fibrous phase composition on morphology and properties of PBAT/PLA microfibrillar composite[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 148-154.

目前,传统石油基塑料在社会各领域得到广泛应用,但难于自然降解,传统塑料的大量使用导致环境出现严重的污染问题^[1-2]。随着人们对环境保护的高度重视,生物可降解塑料的开发和应用受到广泛关注,在众多生物可降解材料中,由于聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(PBAT)具有优异的加工性能以及高韧性,因此在农用地膜、包装等领域得到广泛应用^[3-4]。但 PBAT 的拉伸强度及其弹性模量相对较低,在一定程度上限制了 PBAT 的使用,因此需要对其进行增强改性^[5]。

在对 PBAT 增强改性研究中,常采用聚乳酸(PLA)与 PBAT 进行共混实现其增强改性^[6-7],如莫智翔等^[8]采用质量分数 25% 的 PLA 与 PBAT 进行共混,在未加相容剂时,共混物的拉伸强度为 18.1 MPa;林强等^[9]采用高含量(60%)的 PLA 与 PBAT 进行共混,共混物的拉伸强度小于 26 MPa。为了改善 PLA 与 PBAT 间的相容性,研究人员通过添加填料或离子液体来实现其增容^[10-11],PBAT 的拉伸强度和拉伸弹性模量得到了一定改善,但由于 PLA 分散相是以球形分布在 PBAT 基体中,因此其增强效果不明显。近年来,原位微纤技术作为一种有效的增强聚合物方法受到广泛关注^[12],与常用的聚合物或填料填充增强聚合物相比,原位微纤增强复合材料中所形成的微纤直径较细且可达到纳米级,微纤间不存在团聚现象,微纤比表面积较大以及具有较好的增强效果^[13-14]。在原位微纤增强复合材料中,成纤相的组成、黏度等对微纤的形貌和材料性能具有较大影响^[15]。因此,笔者选择 PLA 作为成纤相,通过在 PLA 中加入滑石粉及扩链剂,然后进行挤出制备成纤相母粒,研究成纤相组成对 PBAT/PLA 微纤复合材料微观形貌、力学性能及流变性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA: 3052D, 密度 1.24 g/cm³, 美国 Naturework 公司;

PBAT: 密度 1.22~1.25 g/cm³, 熔体流动速率(MFR)为 5 g/10 min (190 °C, 2.16 kg), 金晖兆隆高新科技有限公司;

滑石粉: 粒径 3~5 μm, 江苏亿丰粉体原料有限公司;

多环氧官能团共聚物: Joncryl 型扩链剂, ADR-4468, 德国巴斯夫股份公司。

1.2 主要仪器及设备

同向双螺杆挤出机: CTE20, 科倍隆科亚(南京)机械有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): Quanta 250 FEG, 美国 FEI 公司;

万能实验机: CMT6104, 美特斯工业系统(中国)有限公司;

旋转流变仪: HAAKE MARS III, 美国 Thermo-Fisher Scientific 公司;

MFR 试验机: ZRZ2452, 美特斯工业系统(中国)有限公司;

多级挤出拉伸装置: 自制。

1.3 试样制备

(1)成纤相母粒的制备: 将滑石粉、PLA 置于 80 °C 真空烘箱中干燥 12 h, 然后滑石粉、PLA 及 ADR-4468 分别按照表 1 中成纤相母粒的配方混合均匀后, 采用同向双螺杆挤出机挤出得到成纤相母粒, 挤出机各区温度分别为 90, 175, 180, 180, 180 °C。

表 1 成纤相母粒配方

Tab. 1 Formula of fibrous phase masterbatch

Sample	% %		
	PLA	Talc powder	ADR-4468
M3	97	3	0
M6	94	6	0
M9	91	9	0
M12	88	12	0
M6-0.1	94	6	0.1
M6-0.3	94	6	0.3
M6-0.5	94	6	0.5
M6-0.7	94	6	0.7

(2)原位微纤片材挤出: 将成纤相母粒、PLA, PBAT 分别在 70 °C 真空烘箱中继续干燥 12 h 后, 将纯 PLA 与 PBAT 按照 0/100, 5/95, 10/90, 15/85, 20/80 的质量比混合均匀, 利用多级挤出拉伸装置^[16]进行片材挤出, 试样分别标记为 PBAT, PLA-5, PLA-10, PLA-15, PLA-20; 成纤相母粒与 PBAT 按照表 2 质量比混合均匀后进行片材挤出。多级挤出拉伸装置的挤出机各区温度分别为 80, 200, 200, 200, 200 °C, 倍增器及口模温度均为 200 °C, 挤出机螺杆转速为 300 r/min, 三辊牵引速度自上而下分别为 70, 65, 60 r/min。

1.4 测试与表征

MFR 测试: 在温度 190 °C 及砝码重量 2.16 kg 时, 按照 GB/T 3682-2018 对经过挤出机挤出的

表2 PBAT/PLA微纤复合材料配方
Tab. 2 Formula of PBAT/PLA microfibrillar composites

Sample	Content of PBAT/%	Masterbatch	Content of masterbatch/%
PLA-10-3	90	M3	10
PLA-10-6	90	M6	10
PLA-10-9	90	M9	10
PLA-10-12	90	M12	10
PLA-10-6-0.1	90	M6-0.1	10
PLA-10-6-0.3	90	M6-0.3	10
PLA-10-6-0.5	90	M6-0.5	10
PLA-10-6-0.7	90	M6-0.7	10

PLA、成纤相母粒进行熔体流动速率测试。

SEM分析:垂直于挤出方向将制备的PBAT/PLA微纤片材剪成长、宽为200 mm×8 mm的长条,并放置在液氮中淬冷2 h后进行脆断,在60 °C对脆断样干燥6 h,然后对样品断面进行喷金后进行微观形貌观察。

拉伸性能测试:将PBAT及PBAT/PLA微纤片材分别沿挤出方向裁剪成长为75 mm、宽为10 mm的哑铃型标准试样,采用300 mm/min的拉伸速度,按照GB/T 1040.4—2006对所有试样进行拉伸性能测试,并取5个试样的平均值作为测试结果。

流变性能测试:首先分别将PBAT,PBAT/PLA微纤片材置于2 mm厚的矩形模框中,在145 °C先预热3 min,然后模压1 min后进行冷却;测试前,将模压试样裁剪为直径2 cm的圆片,使用旋转流变仪在140 °C下对试样进行频率扫描测试,测试频率区间为0.05~100 rad/s,振幅为1%。

2 结果与讨论

2.1 成纤相母粒的MFR分析

在PBAT/PLA微纤复合材料制备中,成纤相的流动性能对微纤微观形貌的影响较大,因此,在190 °C对PLA和成纤相母粒进行MFR测试,相关数据列于表3。纯PLA的MFR为8.5 g/10 min,当PLA中加入质量分数3%的滑石粉后,M3母粒的MFR略有下降。随着滑石粉含量的增加,母粒的MFR逐渐减小,当滑石粉含量为12%,M12母粒的MFR减小到6.1 g/10 min。滑石粉的增加使母粒的MFR下降,这主要是因为加入的滑石粉为纳米尺寸,具有

表3 成纤相母粒的MFR

Masterbatch	PLA	M3	M6	M9	M12	M6-0.1	M6-0.3	M6-0.5	M6-0.7
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	8.5	7.9	7.6	6.7	6.1	6.6	5.8	3.5	1.9

较大的比表面积,从而使体系黏度增大,流动性下降。对于M6体系,加入质量分数0.1%的扩链剂ADR-4468后,M6-0.1母粒的MFR有所降低,随着ADR-4468加入量的增加,母粒的MFR逐渐下降,当ADR-4468加入质量分数为0.7%时,M6-0.7母粒的MFR大幅下降,为1.9 g/10 min。这主要是因为ADR-4468分子链上含有多个环氧官能团,在熔融挤出过程中,环氧官能团会与PLA分子链末端的羟基及羧基发生化学反应,从而使PLA的分子量增大,导致母粒的黏度增大,MFR下降^[17]。

2.2 微纤复合材料的形貌分析

图1是PLA质量分数分别为5%,10%,15%,20%的PBAT/PLA微纤复合材料的SEM图。从图1可以看出,对于含有5%PLA的试样(PLA-5),图1a中可以看出,有少量的PLA微纤形成,且沿水平挤出方向取向排列,其中部分微纤长度较短;随着PLA含量的增加,所形成的微纤数量逐渐增多,微纤的长度逐渐增大,在PLA-15的断面SEM中,可以清晰地看到有许多较长的PLA微纤形成,其长度大于20 μm。这主要是因为随着PLA含量的增加,在熔体挤出过程中,分散相的熔体液滴受到剪切作用会发生破裂及合并,当PLA含量较低时,熔体液滴间发生碰撞从而合并成大液滴的机会较小,因此所形成的PLA微纤长度较短,但由于受到沿挤出方向的拉伸及剪切作用,所以微纤沿挤出方向取向排列^[18]。

图2为成纤相母粒中滑石粉含量对微纤复合材料SEM影响,其中成纤相母粒的添加质量分数为

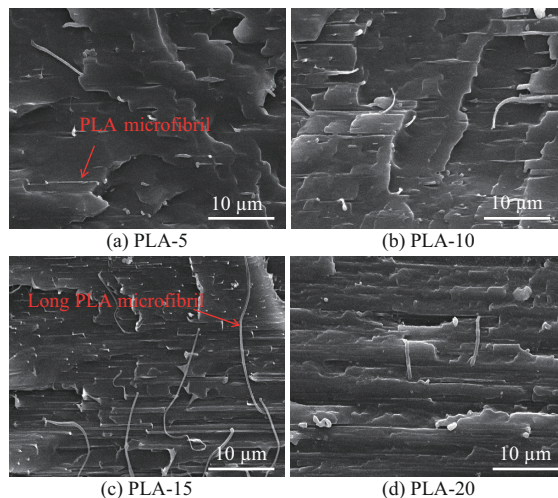


图1 不同PLA含量的PBAT/PLA微纤复合材料SEM图

Fig. 1 SEM images of PBAT/PLA microfibrillar composites with different PLA contents

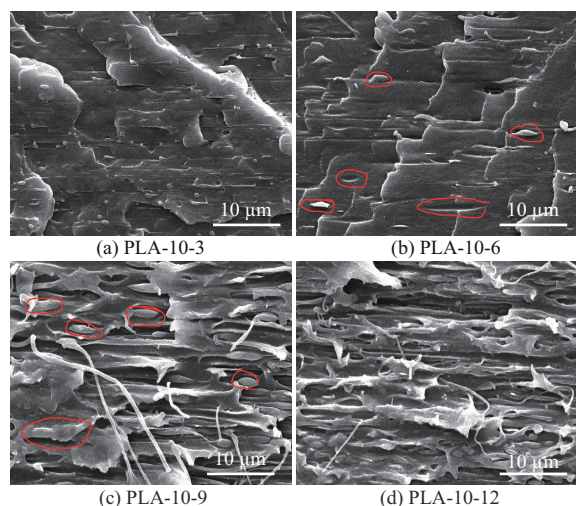


图2 不同滑石粉含量的PBAT/PLA微纤复合材料SEM图
Fig. 2 SEM images of PBAT/PLA microfibrillar composites with different talc powder contents

10%。从图2可以明显看出,当在PLA中添加质量分数3%的滑石粉时,与未加滑石粉的试样(PLA-10)相比,PLA-10-3试样断面中可以明显看到许多细小的球状粒子,这是因为滑石粉的加入增大了成纤相母粒的黏度,导致其在剪切应力下变形成微纤的能力减小。随着成纤相母粒中滑石粉含量的增加,在PLA-10-6和PLA-10-9中可以看到存在直径较大的PLA微纤,如图2b和图2c中红色实线内所示,另外,在PLA-10-9与PLA-10-12试样中有许多PLA微纤从基体中拨出。

图3分别为成纤相母粒中添加了质量分数0.1%、0.3%、0.5%、0.7%的扩链剂ADR-4468的PBAT/PLA微纤复合材料SEM图,在成纤相中固定

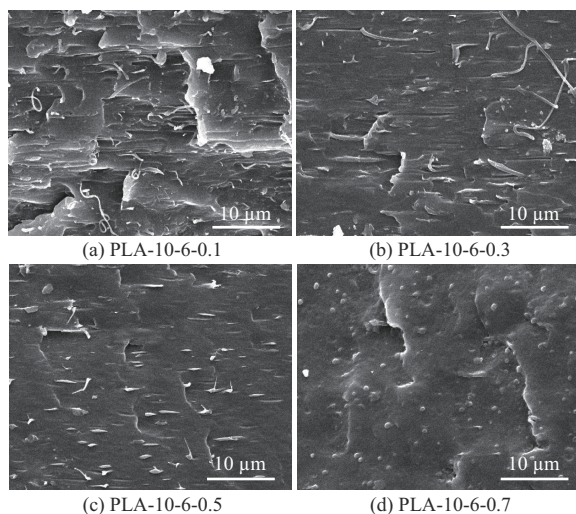


图3 不同ADR-4468含量的PBAT/PLA微纤复合材料SEM图
Fig. 3 SEM images of PBAT/PLA microfibrillar composites with different ADR-4468 contents

滑石粉的质量分数为6%,成纤相母粒的质量分数为10%。可以看到,与未加ADR-4468的PLA-10-6试样相比,随着在成纤相母粒中ADR-4468含量的增加,所形成的PLA微纤直径明显增大、长度明显减小。当ADR-4468质量分数为0.7%时,如图3d所示,只有少量的分散相PLA形成短状微纤,其余大部分PLA以球状分散在PBAT基体中。这主要是因为随着ADR-4468含量的增加,成纤相母粒的黏度增大,导致在熔融挤出过程中,高黏度的成纤相液滴在受到剪切拉伸应力时,其沿挤出方向变形为微纤的能力大幅减弱,因此所形成的微纤直径逐渐增大,甚至很难形成微纤。

2.3 微纤复合材料的力学性能分析

表4为不同PLA微纤、滑石粉、ADR-4468含量PBAT/PLA微纤复合材料的力学性能数据。由表4可见,纯PBAT的拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率分别为153.2 MPa, 36.1 MPa, 604.1%,对于含有质量分数5%PLA微纤的PLA-5试样,其拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率分别为172.5 MPa, 42.6 MPa, 145.7%,与PBAT相比,其拉伸强度提高18%,而断裂伸长率却大幅下降。PLA微纤质量分数为10%时,PLA-10试样的拉伸强度最大(53.8 MPa),是PBAT的1.49倍,而断裂伸长率继续下降。当进一步提高PLA微纤的含量,微纤复合材料的拉伸强度开始减小,断裂伸长率进一步下降,而拉伸弹性模量随着PLA微纤含量的增加逐渐增大。这主要是因为刚性PLA微纤的拉伸弹性模量比PBAT的高,更多PLA微纤的形成有利于提高微纤复合材料的拉伸弹性模量;然而,虽然刚性PLA微纤有增

表4 PBAT/PLA微纤复合材料的力学性能数据

Tab. 4 Mechanical performance datas of PBAT/PLA microfibrillar composites

Sample	Tensile elastic modulus/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%
PBAT	153.2	36.1	604.1
PLA-5	172.5	42.6	145.7
PLA-10	221.6	53.8	115.7
PLA-15	236.8	52.7	30.3
PLA-20	248.2	46.7	22.3
PLA-10-3	215.7	48.4	25.6
PLA-10-6	207.9	46.5	35.2
PLA-10-9	197.5	43.2	37.9
PLA-10-12	183.4	39.5	55.0
PLA-10-6-0.1	218.6	49.1	44.8
PLA-10-6-0.3	240.3	53.7	53.0
PLA-10-6-0.5	215.8	48.9	59.2
PLA-10-6-0.7	195.2	48.2	64.6

强作用,但由于PLA微纤与PBAT基体间的界面相容性差,在试样拉伸过程中,微纤与基体间界面很快发生破坏,导致材料快速发生断裂,因此断裂伸长率大幅下降。与PLA-10试样相比,当成纤相母粒中加入滑石粉后,随着滑石粉含量的增加,微纤复合材料的拉伸弹性模量、拉伸强度逐渐减小,而断裂伸长率先下降后上升;结合表3和图2分析,这可能是因为随着滑石粉含量的增加,成纤相母粒的黏度变大,导致形成的微纤直径增大,较大直径的PLA微纤与基体间的相容性变得更差,在拉伸过程中两相界面更容易受到破坏,因此,在成纤相母粒中滑石粉含量较低(3%)时,PLA-10-3试样的拉伸强度和断裂伸长率都下降。当PLA成纤相母粒中的滑石粉含量增大时(6%,9%,12%),微纤复合材料的断裂伸长率反而增大,但都比PLA-10试样的要小,这可能是因为PLA微纤中的滑石粉部分迁移到微纤与基体界面,部分改善了两相的相界面作用,但由于所形成的微纤直径较大,两者共同作用结果导致拉伸强度下降,而断裂伸长有所增加。

当含有滑石粉的成纤相母粒中加入质量分数0.1%的ADR-4468,与未加ADR-4468试样(PLA-10-6)相比,PLA-10-6-0.1试样的拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率有所提高,继续增大ADR-4468的含量,微纤复合材料的拉伸弹性模量和拉伸强度先增大后下降,而断裂伸长率逐渐增大。这主要是因为少量ADR-4468的加入(0.1%,0.3%)可以改善成纤相与基体相之间的相容性,使材料性能得到提高。当ADR-4468的加入量过多时,会造成成纤相母粒的黏度增大,导致形成的微纤直径增大、长度缩短,因此拉伸弹性模量及拉伸强度减小。

2.4 微纤复合材料的流变性能分析

微纤复合材料的流变特性可以在一定程度上反映其内部的微观结构。图4是不同PLA含量PBAT/PLA微纤复合材料的储能模量(G')及复数黏度(η^*)随角频率(ω)变化曲线,从图4a可以看出,在测试的整个频率区间,所有试样的 G' 均随着 ω 的增大而增大,其中PBAT的 G' 最低。随着PLA微纤含量的增加,试样的 G' 逐渐增大,其中,低PLA微纤含量试样(PLA-5)的 G' 增大幅度较小;当PLA微纤质量分数为20%时,PLA-20的 G' 在低频区间存在一个明显平台,结合图1可知,这是因为PLA-20内部含有的PLA微纤数量较多,且微纤长度较长,PLA

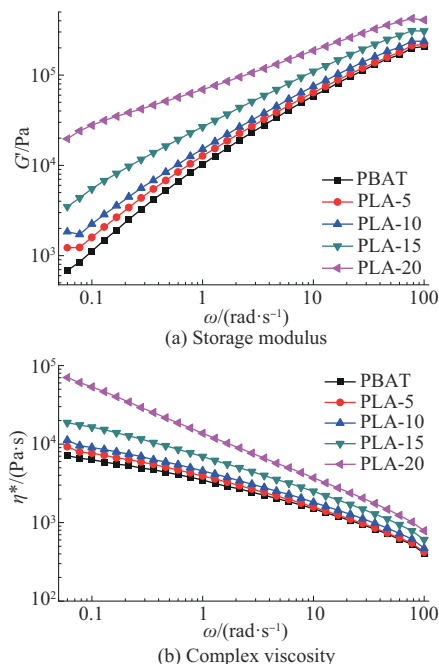


图4 不同PLA含量PBAT/PLA微纤复合材料的流变曲线
Fig. 4 Rheology curves of PBAT/PLA microfibrillar composites with different PLA contents

微纤间形成了一定的物理缠结网络结构,从而阻碍了PBAT的分子链运动。由图4b可见,PLA-15与PLA-20试样的 η^* 随着 ω 增大而降低幅度较大,表现出明显的剪切变稀行为,这主要是因为试样内部含有较多的PLA微纤,而PLA微纤与PBAT基体的相容性较差,在剪切作用下,PLA微纤容易发生解缠结并沿一定方向发生取向,因此 η^* 下降。

图5为成纤相母粒中含有不同滑石粉含量PBAT/PLA微纤复合材料的 G' 及 η^* 随 ω 变化曲线。由图5a可知,对于未加滑石粉且含有10% PLA微纤的PLA-10试样,其呈现出最大的 G' ,成纤相母粒中加入质量分数3%的滑石粉后,PLA-10-3试样的 G' 减小,随着滑石粉含量的增加,体系的 G' 继续减小。这是因为滑石粉的加入使成纤相母粒的黏度增大,导致形成的PLA微纤直径变大、长度缩短,因此其增强效果下降。图5b中滑石粉的加入使体系的 η^* 减小,同时剪切变稀行为也减弱,这与滑石粉的加入导致所形成的PLA微纤直径增大及微纤长度缩短有关。

图6为成纤相母粒中含有质量分数6%的滑石粉及不同ADR-4468含量(0.1%,0.3%,0.5%,0.7%)PBAT/PLA微纤复合材料的 G' 及 η^* 随 ω 变化曲线。从图5a可以明显看出,所有成纤相母粒中含有ADR-4468的体系,其 G' 及 η^* 都比未含ADR-4468

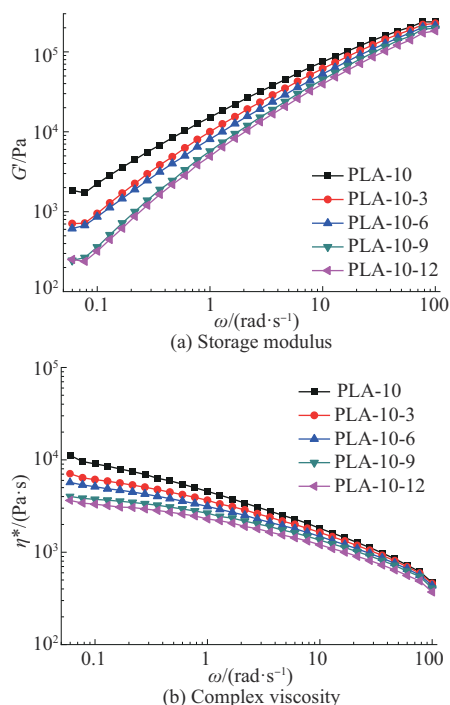


图5 不同滑石粉含量PBAT/PLA微纤复合材料的流变曲线

Fig. 5 Rheology curves of PBAT/PLA microfibrillar composites with different talc powder contents

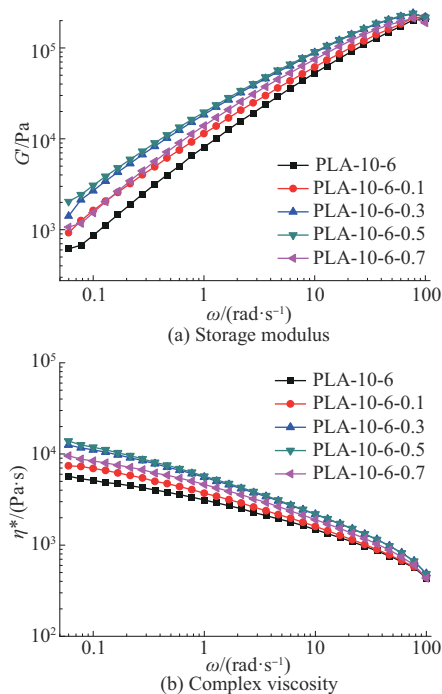


图6 不同ADR-4468含量PBAT/PLA微纤复合材料的流变曲线

Fig. 6 Rheology curves of PBAT/PLA microfibrillar composites with different ADR-4468 contents

试样(PLA-10-6)的要大,这主要是因为扩链剂的加入提高了成纤相与基体相间的界面相容性;随着ADR-4468含量的增加,体系的 G' 及 η^* 均先增大后减小。

3 结论

(1)随着滑石粉含量的增加,成纤相母粒的MFR逐渐减小。对于M6体系,随着扩链剂ADR-4468加入量的增加,成纤相母粒的MFR逐渐下降,当ADR-4468质量分数为0.7%时,M6-0.7母粒的MFR大幅下降,为1.9 g/10 min。

(2)在成纤相母粒中,滑石粉的加入降低了PLA形成微纤的能力,与未添加ADR-4468的PLA-10-6相比,随着ADR-4468含量的增加,其所形成的PLA微纤直径明显增大、长度明显减小;当ADR-4468质量分数为0.7%时,只有少量的PLA形成短状微纤,其余大部分PLA以球状分散在PBAT基体中。

(3) PLA微纤质量分数为10%时,PLA-10试样的拉伸强度最大,是PBAT的1.49倍,但断裂伸长率大幅下降;随着成纤相母粒中滑石粉含量的增加,微纤复合材料的拉伸弹性模量、拉伸强度逐渐减小,而断裂伸长率先下降后上升;在含有滑石粉的成纤相母粒中加入ADR-4468后,微纤复合材料的拉伸强度先增大后下降,而断裂伸长率逐渐增大。

(4) 含有PLA微纤的试样, G' 均随 ω 的增大而增大,随着成纤相母粒中滑石粉含量的增加,试样的 G' 和 η^* 均减小,所有成纤相母粒中含有ADR-4468的体系, G' 及 η^* 均高于未含ADR-4468的试样。

参考文献

- [1] 林军,李晓萱,柴喜存,等. 淀粉/PBAT可降解地膜在不同环境下老化性能对比[J]. 复合材料学报, 2024, 41. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20240009.002.
LIN Jun, LI Xiaoxuan, CHAI Xicun, et al. Comparison of aging properties of starch/PBAT degradable mulching film in different environments[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240009.002.
- [2] 熊熙,李娜,冯潮,等. PBAT/滑石粉复合材料的制备与性能[J]. 塑料, 2023, 52(4):50-53.
XIONG Xu, LI Na, FENG Chao, et al. Structure and property of PBAT/Talc powde composite[J]. Plastic, 2023, 52(4):50-53.
- [3] 李嘉彦,夏发明,王晓广,等. 不同增容剂对PBAT/TPS复合材料性能影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(8):48-52.
LI Jiayan, XIA Faming, WANG Xiaoguang, et al. Effect of different compatibilizer on properties of PBAT/TPS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(8):48-52.
- [4] BAI J, PEI H, ZHOU X, et al. Reactive compatibilization and properties of low-cost and high-performance PBAT/thermoplastic starch blends[J]. European Polymer Journal, 2021, 143. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.110198.

- [5] PERUMAL N, SREEKANTAN S, HAMID ZA, et al. Effect of plasticizer and compatibilizer on properties of polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) with acetylated starch[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2024, 32(1):289–302.
- [6] 张佰城, 郑雨欣, 许柯, 等. PLA/PBAT 复合材料增容增塑的研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(12):165–169.
- ZHANG Baicheng, ZHENG Yuxin, XU Ke, et al. Research progress on capacitation and plasticization of PLA/PBAT composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(12):165–169.
- [7] 陈小英, 徐鼎, 庞素娟, 等. PLA 增强改性 PBAT 共混物的制备及性能研究[J]. *化工新型材料*, 2016, 44(6):122–125.
- CHEN Xiaoying, XU Nai, PANG Sujuan, et al. Preparation and property of PLA-reinforced PBAT blend[J]. *New Chemical Materials*, 2016, 44(6):122–125.
- [8] 莫智翔, 刘小超, 刘跃军, 等. 苯乙烯-马来酸酐共聚物对 PLA/PBAT 共混物的相形态及其性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(4):2 096–2 106.
- MO Zhixiang, LIU Xiaochao, LIU Yuejun, et al. Effect of styrene-maleic anhydride on phase morphology and properties of PLA/PBAT blends[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(4): 2 096–2 106.
- [9] 林强, 丁正, 王迎雪, 等. PLA/PBAT 复合材料的结构与性能[J]. *工程塑料应用*, 2016, 45(3):65–67.
- LIN Qiang, DING Zheng, WANG Yingxue, et al. Structure and properties of PLA/PBAT composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 45(3):65–67.
- [10] JIN Y, MEN S, WENG Y. An investigation of the impact of an amino-ended hyperbranched polymer as a new type of modifier on the compatibility of PLA/PBAT blends[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2018, 38(3):223–229.
- [11] ZHOU Y, QIU S, WATERHOUSE GIN, et al. Enhancing the properties of PBAT/PLA composites with novel phosphorus-based ionic liquid compatibilizers[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 27. DOI:10.1016/j.mtcomm.2021.102407.
- [12] MAHMUD MB, ANSTEY A, SHAAYEGAN V, et al. Enhancing the mechanical performance of PA6 based composites by altering their crystallization and rheological behavior via in-situ generated PPS nanofibrils[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 195. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.108067.
- [13] LIU T, JU J, CHEN F, et al. Superior mechanical performance of in-situ nanofibrillar HDPE/PTFE composites with highly oriented and compacted nanohybrid shish-kebab structure[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 207. DOI: 10.1016/j.compsci-tech.2021.108715.
- [14] HOSSEINNEZHAD R, VOZNIK I, MORAWIEC J, et al. Nanofibrillar green composites of polylactide/polyamide produced in situ due to shear induced crystallization[J]. *Composites Communications*, 2020, 22. DOI:10.1016/j.coco.2020.100512.
- [15] LUO S, SUN J, HUANG A, et al. The crystallization and rheological behaviors of in situ microfibrillar isotactic polypropylene/polyamide 66 composites with a selective β -nucleating agent distribution[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(48). DOI: 10.1002/app.49580.
- [16] 孙静, 黄安荣, 李剑, 等. PBAT/PA6 原位微纤复合材料的性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(3):21–27.
- SUN Jing, HUANG Anrong, LI Jian, et al. Research on the properties of PA6/PBAT in-situ microfibrillar composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(3):21–27.
- [17] 甯阳, 邹俊. 环氧扩链剂增容 PLA/竹纤维共混物制备与表征[J]. *塑料科技*, 2021(4):6–9.
- NING Yang, ZOU Jun. Preparation and characterization of PLA/bamboo fiber composites compatibilized by epoxy chain extender [J]. *Plastics Science and Technology*, 2021(4):6–9.
- [18] DONG J, HUANG A, SUN J, et al. Effect of draw ratio on the morphologies and properties of in situ microfibrillar POE/PTT composites[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(S1):E629–E637.